INVESTIGACION y CIENCIA

CAOS EN EL UNIVERSO CUANTICO

SEXO CONTRA PARASITOS

COMUNICACIONES OPTICAS DE QUINTA GENERACION

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN



TORTUGAS MARINAS

MARZO 1992
600 PTAS.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa



Marzo de 1992 Número 186

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

SECCIONES

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Carlos Gracia: *La vida de las plantas en un mundo enriquecido en CO_2*; Ramón Pascual: *El caos cuántico*; Pilar Ramos: *Absorción celular de la glucosa*; Manuel Puigcerver: *Discos de acreción en estrellas binarias*; Joandomènec Ros: *La navegación de las tortugas marinas*; Amando García: *Comunicaciones ópticas: la quinta generación*; Miguel Cordero: *Vida compartida;* J. Vilardell: *Hace...* y *Taller y laboratorio*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; Shigeko Suzuki: *De cerca*; Luis Bou: *Juegos matemáticos*

Ciencia y sociedad:

J. Bernabeu y J. A. Peñarrocha, J.-D. Ros, J. E. Llebot, A. Villaverde, J. M. V. Martínez, J. M. Fullola

Ciencia y empresa:

Manuel Puigcerver

Libros:

Laureano Carbonell, Luis Alonso y Antonio F. Rañada

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
7	Susan Bassow, Univ. de Harvard
8	Patricia J. Wynne
9	Johnny Johnson (*izquierda y derecha*), Fakhri A. Bazzaz (*centro*)
10	Bert G. Drake, Centro Smithsoniano de Investigación del Medio Ambiente
11	Fakhri A. Bazzaz
12	Eric D. Fajer (*arriba a la izquierda y abajo*), Johnny Johnson (*derecha*)
14	Martin C. Gutzwiller
16	Laurie Grace
17	Martin C. Gutzwiller
18	Laurie Grace
19	Eric Heller, Univ. de Washington
20	Laurie Grace
23	David E. James y Mike M. Mueckler
24	Michael Goodman (*arriba y abajo a la derecha*), L. Howard Holley (*abajo a la izquierda*)
25-27	Michael Goodman
46-48	George Retseck
49	Johnny Johnson
50-51	George Retseck
52-53	Johnny Johnson
57	Hughes/Bruce Coleman, Inc.
58-59	Laurie Grace (*arriba*), Patricia J. Wynne (*abajo*)
60	Jana Brenning (*arriba, izda. y dcha.*), Kenneth J. Lohmann (*abajo, derecha*)
61	Laurie Grace
62	James D. Watt, Animnals/Animals
65	José L. Castrillo
66-72	José L. Castrillo y Biopunt
74-75	Emmanuel Desurvire
76-79	Ian Worpole
80	Neal S. Bergano, Laboratorios AT&T Bell
81	Terry W. Cline, Laboratorios AT&T Bell
84-85	Tomo Narashima
86	Archivo Bettmann (*arriba*), CNRI/Science Photo Library, Photo Researchers Inc. (*abajo, izquierda*), James Dennis/CNRI/Phototake (*abajo, centro*), Phototake (*abajo, dcha.*)
87	Richard Nowitz/Phototake (*arriba*), C. James Webb/Phototake (*abajo, izda.*), CNRI/SPL/Photo Researchers, Inc. (*abajo, derecha*)
88-89	Patricia J. Wynne (*arriba*), Tom McHugh, Photo Researchers, Inc. (*abajo, izda.*), David Levenson (*abajo, dcha.*)
90	©1991 John McGrail
91	Patricia J. Wynne
92	Johnny Johnson
102-104	Documentos Pour la Science



LA FOTOGRAFIA DE LA PORTADA muestra jóvenes tortuguitas de *Chelonia mydas*, la tortuga verde. Esta especie, al igual que otras tortugas marinas, está muy bien dotada para la navegación. Al salir del huevo, buscan el mar aleteando certeramente. Cuando adultas, navegarán más de 1000 millas desde su zona de alimentación hasta su playa de nidificación cada pocos años. Para su orientación se sirven, tal parece, del campo geomagnético y la dirección de las olas oceánicas para guiar sus viajes (véase "La navegación de las tortugas marinas", de Kenneth J. Lohmann, en este mismo número).

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
DIRECTOR EDITORIAL José María Valderas Gallardo
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal Garfella
PRODUCCIÓN César Redondo Zayas
M.ª Cruz Iglesias Capón
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Viladomat, 291 6º 1ª - 08029 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48 Telefax 419 47 82

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR Jonathan Piel
BOARD OF EDITORS Alan Hall, *Executive Editor*; Michelle Press, *Managing Editor*; Timothy M. Beardsley; Elizabeth Corcoran; Deborah Erickson; Marguerite Holloway; John Horgan, *Senior Writer*; Philip Morrison, *Book Editor*; Corey S. Powell; John Rennie; Philip E. Ross; Ricki L. Rusting; Russell Ruthen; Gary Stix; Paul Wallich; Philip M. Yam.
PUBLISHER John J. Moeling, Jr.
ADVERTISING DIRECTOR Robert F. Gregory
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Claus-Gerhard Firchow
CHAIRMAN OF THE BOARD Dr. Pierre Gerckens
CHAIRMAN EMERITUS Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Viladomat, 291 6º 1ª
08029 Barcelona (España)
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48
Fax 419 47 82

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	6.600	12.000
Extranjero	7.300	13.400

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 600 pesetas
Extraordinario: 775 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

— En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

— El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Viladomat, 291 6º 1ª - 08029 Barcelona
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48

PUBLICIDAD

Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. 409 70 45
Fax 409 70 46



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 - 76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por Scan V2, S.A., Pje. Jansana, 8 Bajos - 08902 l'Hospitalet (Barcelona)
Imprime Rotographik, S.A. Ctra. de Caldes, km 3,7 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Hace...

... cincuenta años

SCIENTIFIC AMERICAN: «Aunque hablar de las alteraciones que la economía de guerra está creando en los materiales civiles de toda clase no constituya una novedad, nos parece oportuno consignar algunas de las cosas que van a influir en el futuro rumbo de nuestra revista. El papel tenderá más a su tonalidad amarilla natural. Ello se debe a las restricciones en los usos civiles del cloro, que sirve para blanquear la pulpa de la que se hace el papel. Además, tal como se habrá observado, el número que el lector tiene en las manos está compuesto con un tipo de letra distinto del que traían los números anteriores. Este nuevo tipo, si bien es tan legible como la anterior fundición, resulta un poquito más compacto; ello posibilita incluir en una página alrededor de un diez por ciento más de palabras.»

«Aunque el ojo animal enfoca automáticamente los objetos a distancias cambiantes, los ingenieros ópticos han recelado de no pocos proyectos para incorporar esa función en las lentes fotográficas. Pero ahora la compañía Bausch y Lomb ha desarrollado una lente cinematográfica compuesta de cuatro elementos, uno de los cuales es un elemento bicóncavo que se hace oscilar, por medios electrónicos, en torno a su eje. Este elemento oscilante realiza un movimiento limitado a tres décimas de milímetro, pero a un ritmo de 23.200 veces por minuto, variando así continuamente el enfoque de modo que todos los objetos situados entre algo más de un metro y el infinito son captados uniformemente. Aunque los objetos aparecen todos un poco más borrosos que con las lentes convencionales, son muchos los fotógrafos que consideran un avance este dispositivo.»

«Bischoff, uno de los primeros espadas europeos en anatomía, fue famoso hace unos 70 años. Durante mucho tiempo se dedicó a pesar cerebros y, según la información que acumuló, observó que el peso medio del cerebro masculino es de 1350 gramos y el femenino de 1250 gramos. Esto, según razonaba, constituía sin más una prueba irrefutable de la superioridad mental del hombre sobre la mujer. Esta hipótesis la defendió toda su vida con la convicción de un fanático. Científico hasta el fin, en su testamento estipuló que su propio cerebro se añadiese a tan impresionante estadística: ¡pesó sólo 1245 gramos!»

... cien años

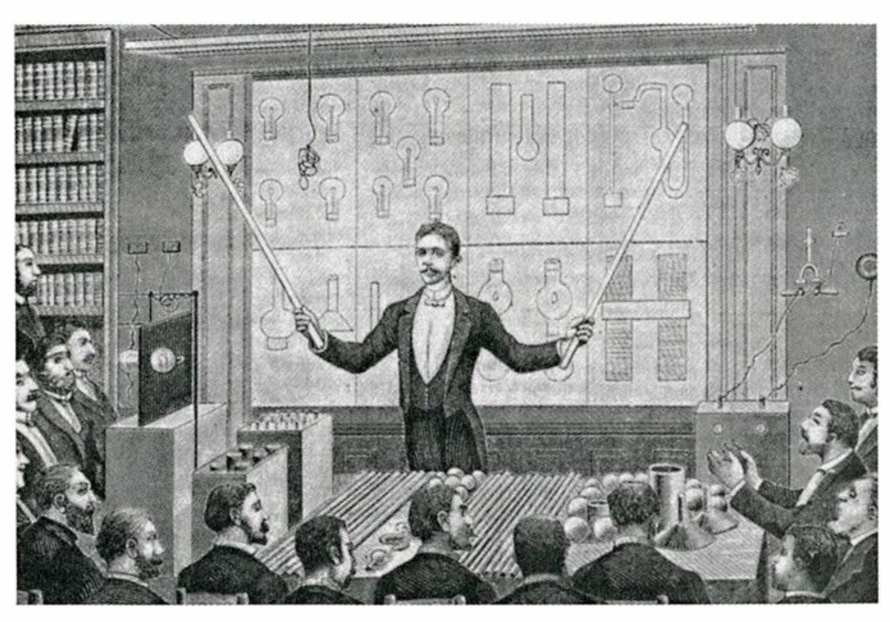
SCIENTIFIC AMERICAN: «El aire comprimido es quizás el primer rival de la transmisión eléctrica. En la actualidad se emplea principalmente en las minas, donde sigue siendo un rival muy efectivo de la electricidad, aunque, según parece por el momento, es probable que sea paulatinamente sustituido por esta última. En París hay en explotación, dícese que con éxito, una fábrica que produce y distribuye aire comprimido. Según un artículo del profesor Unwin, la transmisión de potencia mediante aire comprimido resulta viable hasta distancias del orden de cuarenta kilómetros. Parece posible transmitir una potencia de 10.000 caballos a una distancia de cuarenta kilómetros, por una tubería de 75 centímetros, a una presión de 9,3 kilogramos por centímetro cuadrado con una pérdida de carga de sólo un doce por ciento.»

«Si tomamos un buen conductor eléctrico como el cobre y lo enfriamos, su resistencia casi desaparece a temperaturas muy bajas. Si descendemos por debajo de más de un centenar de grados bajo cero, se convierte en un conductor casi perfecto. Y si lo calentamos, su resistencia crece más y más. Tomemos el vidrio, que es un buen aislante, o cualquier otro material aislante; al enfriarlo, pierde su poder aislador, pero si lo calentamos hasta ponerlo al rojo, se parece a un conductor.»

«El renombrado filósofo Sir William Thomson ha ingresado en la aristocracia británica bajo el nuevo nombre de Lord Kelvin. Este ha tomado recientemente posesión de su escaño en la Cámara de los Lores, presentado por el noble científico Lord Rayleigh.»

«Pregunta C. R. W.: ¿Qué fuerza impide que los ladrillos de la hilada de fondo de nuestras grandes edificaciones queden aplastadas por el tremendo peso que soportan encima? R.: *Un solo ladrillo rojo común, si está correctamente colocado en cemento fuerte, iguala a una carga de 12 toneladas y haría falta una columna de ladrillos ligados con cemento de unos 3000 metros de altura para aplastar la hilada de fondo.*»

«Mr. Nikola Tesla concluyó su conferencia con algunos experimentos de iluminación con tubos de gases enrarecidos sin cables ni electrodos, tubos nuevamente introducidos en el campo electrostático periódico generado entre uno de los polos aislados del carrete, por una parte, y, por la otra, una placa metálica colocada encima del experimentador y que estaba unida al otro polo del carrete.»



Conferencia de Mr. Tesla en París

La vida de las plantas en un mundo enriquecido en CO_2

Los niveles crecientes de CO_2 atmosférico terminarán por alterar la estructura y función de los ecosistemas. Cambios que no serán necesariamente beneficiosos para las plantas

Fakhri A. Bazzaz y Eric D. Fajer

Las plantas constituyen la piedra angular, en verde, de la vida en la Tierra. La abundancia y productividad de los árboles, matorrales y herbáceas, plantas domésticas o silvestres, determinan el modo en que los ecosistemas hacen circular los gases y los nutrientes, limpian el agua, crean suelos y proporcionan sostén para múltiples formas de vida. Cualquier variación significativa de la productividad y composición de la vida vegetal puede provocar una serie de cambios en cadena que afecten por igual a herbívoros, carnívoros y omnívoros.

Uno de esos cambios podría estar ya en camino. La quema de combustibles fósiles y la deforestación están alterando de manera notable la composición de la atmósfera. Tal vez el componente atmosférico cuya concentración se vea más afectada por la actividad humana sea el dióxido de carbono (CO_2). Desde el comienzo de la era industrial, la concentración de este gas ha crecido de 280 a 350 partes por millón (el nivel más elevado en los últimos 160.000 años, de los que se puede disponer de registros merced al análisis de muestras de hielo). Medidas efectuadas en el observatorio de Mauna Loa en Hawai atestiguan un incremento de un 20 por ciento en los niveles de CO_2 desde 1957 hasta nuestros días. Aunque las estimaciones varían de unos autores a otros, los expertos vaticinan una duplicación de la concentración global de CO_2 durante la segunda mitad del siglo XXI.

A primera vista, las elevadas concentraciones de CO_2 podrían parecer una bendición para la agricultura. Las primeras investigaciones daban pie a suponer que un ambiente con elevada concentración de CO_2 favorecería el crecimiento de las plantas. Era de esperar que ese efecto de fertilización por CO_2, como dio en llamarse, se recibiera mejor en las plantas que disponen de abundantes nutrientes, luz y agua.

El efecto de fertilización prometía también constituirse en una suerte de amortiguador de las preocupaciones por el calentamiento global. Al crecer más las plantas en estos ambientes, absorberían mayores cantidades de CO_2 de la atmósfera. Cabía, pues, suponer que el nivel de este gas que provoca el efecto invernadero, es decir, que atrapa la energía solar que la tierra rerradia en forma de calor, fuera menor de lo esperado. Se había incluso llegado a introducir el efecto de fertilización en los modelos atmosféricos que se ideaban para predecir la cantidad de CO_2 producida por las actividades industriales y uso del suelo que será absorbida por la vegetación terrestre.

Nuestros experimentos, llevados a cabo en la Universidad de Harvard, y los trabajos de colegas pertenecientes a distintas instituciones sugieren que las hipótesis acerca de los posibles beneficios de un mundo rico en CO_2 se han exagerado. Se ha demostrado que un caso aislado de respuesta positiva de una planta a las elevadas concentraciones de CO_2 no tiene por qué traducirse necesariamente en un aumento del crecimiento de toda la comunidad vegetal. Más aún, hay razones para poner en duda la idea de que las plantas se conviertan en sumideros dispuestos a absorber los niveles crecientes de dióxido de carbono.

Las reflexiones acerca de los beneficios de un mundo enriquecido en CO_2 encuentran su justificación en el desarrollo de la fotosíntesis. En este proceso químico fundamental, las plantas captan moléculas de CO_2 y, con ayuda de la energía de la luz visible, fabrican hidratos de carbono. El anhídrido carbónico de la atmósfera penetra por difusión en el interior de la planta a través de los estomas, poros localizados en la capa más externa de células de la hoja. El gas termina por llegar a los cloroplastos, orgánulos celulares donde se realiza la fotosíntesis.

Un mecanismo capaz de explicar por qué la concentración de CO_2 repercute en un aumento de las tasas de fotosíntesis y, por tanto, en el desarrollo vegetal lo podemos ver en su freno a las pérdidas de agua. La entrada de CO_2 viene a representar un coste para la planta; por cada molécula de dióxido de carbono que entra a través de los estomas se pierden entre 100 y 400 moléculas de agua.

Ahora bien, en una atmósfera rica en CO_2 el gradiente de concentración de este gas entre el interior de la hoja y el aire que la circunda es más acusado. Se difundirían, pues, cantidades equivalentes de dióxido de carbono a través de los poros estomáticos, aun cuando las células de guarda, que regulan la apertura de estos poros, los mantengan menos abiertos. La reducción de la apertura estomática recortaría las pérdidas de agua; en consecuencia, las plantas necesitarán menos

FAKHRI A. BAZZAZ y ERIC D. FAJER han estudiado diversos aspectos del papel que el dióxido de carbono atmosférico desempeña en los ecosistemas. Bazzaz, que ocupa la cátedra H. H. Timken de la Universidad de Harvard, lleva veinte años investigando la repercusión de las concentraciones crecientes de CO_2 en la vida vegetal. Fajer acaba de doctorarse en Harvard con una tesis sobre el impacto de ese gas en plantas e insectos herbívoros.

1. TORRE instrumentada en el bosque de Harvard para medir el intercambio de CO_2 entre los árboles y la atmósfera; los datos recogidos ayudan a cuantificar el papel de los bosques en el ciclo global del carbono. Los discos circulares evitan la entrada de agua en los tubos de toma de gases.

agua para crecer. Además, la reducción de la apertura estomática contribuiría a mejorar el estado fitosanitario de muchas, ya que restringiría la entrada de contaminantes presentes en el aire (verbigracia, dióxido de azufre) con la disminución del posible daño consiguiente.

Además de suponer un ahorro de agua para los vegetales, un entorno rico en CO_2 puede servir para que ciertas plantas no derrochen energía durante la fotosíntesis. Ello se predica, en particular, del grupo de plantas C_3. La inmensa mayoría de las especies forestales son plantas C_3; lo son también cultivos muy importantes: arroz, trigo, patatas y muchas legumbres. Durante la etapa inicial de fijación del dióxido de carbono, las plantas C_3 engarzan el gas a un azúcar de cinco átomos de carbono llamado ribulosa bifosfato (RuBP), en presencia de la enzima RuBP-carboxilasa, produciendo



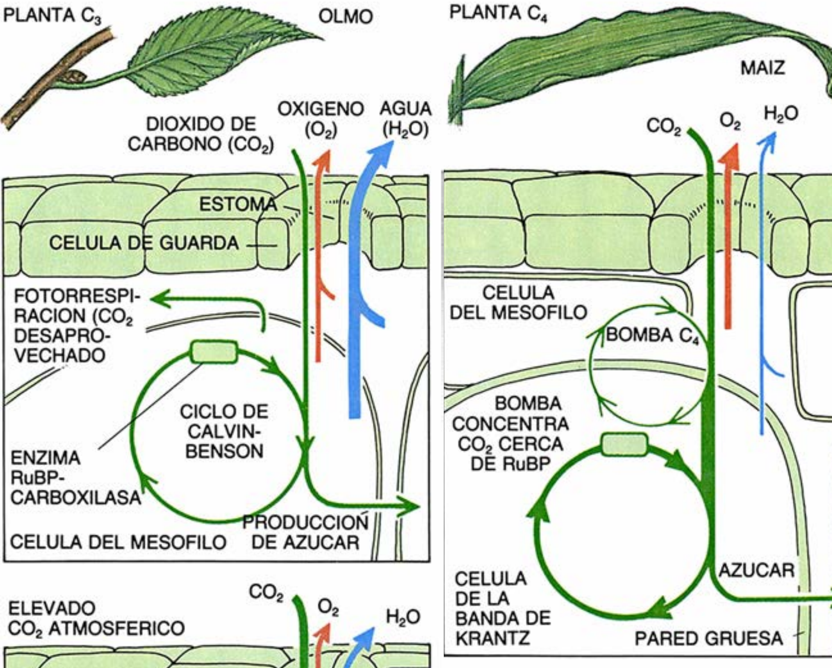
un compuesto inestable de seis átomos de carbono. Esta molécula de corta vida se descompone en dos derivadas de tres átomos de carbono cada una; de donde el nombre de C_3 que reciben tales plantas. Estos derivados experimentan una serie de reacciones en el ciclo de Calvin-Benson, que culminan con la producción de azúcares.

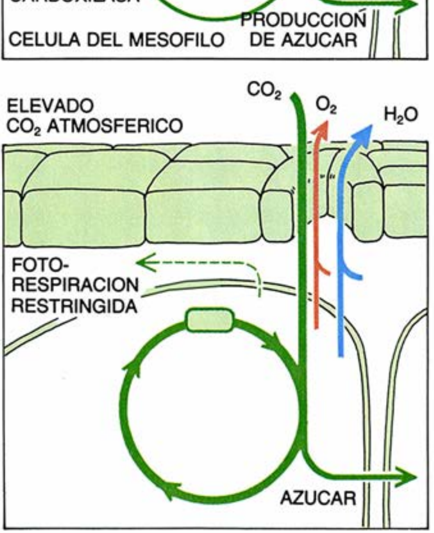
Bajo condiciones atmosféricas normales, el oxígeno compite con el CO_2 por el centro activo de la RuBP-carboxilasa. Si el oxígeno compite con el CO_2, la planta pierde energía porque fija menos dióxido de carbono. En este caso, el oxígeno se combina con la RuBP-carboxilasa para formar un azúcar de tres átomos de carbono y otro compuesto de dos átomos de carbono que se recicla mediante un proceso de fotorrespiración, que consume energía.

Al aumentar la concentración de CO_2, potencia su capacidad para ocupar el centro activo de la RuBP-carboxilasa, puesto que la proporción de moléculas de CO_2 presentes es mayor. Además, en algunos experimentos se pudo comprobar que la fotorrespiración disminuyó hasta un 50 por ciento al aumentar la concentración de CO_2 hasta 600 partes por millón, señal de que las plantas empleaban más energía para construir sus propios tejidos.

A pesar de estas consideraciones fisiológicas y bioquímicas, las tasas fotosintéticas no siempre son mayores en los ambientes ricos en CO_2. A menudo, las plantas que crecen en estos ambientes aumentan de salida su tasa de fotosíntesis, mas, con el transcurso del tiempo, la tasa decrece hasta aproximarse a la que presentan las plantas que viven en ambientes donde la concentración de CO_2 es equivalente a la de la atmósfera actual. Aunque las razones que explican esta disminución no son claras, se han propuesto algunos mecanismos.

La primera idea sugiere que el incremento de la fotosíntesis se traduce en un exceso de almidón acumulado en los cloroplastos, lo que entorpece el funcionamiento normal de esos orgánulos. En presencia de grandes concentraciones de CO_2, se ha postulado también, la capacidad inicial que posee una planta de sintetizar azúcares excede a su capacidad para movilizar los subproductos de almidón y transportarlos hasta las partes del vegetal en crecimiento activo. En estas condiciones, un mecanismo bioquímico de retroalimentación frenaría la tasa de fotosíntesis. Una tercera hipótesis implica al fósforo, nutriente necesario para el transporte de los hidratos de carbono acumulados: tal vez el fósforo deje de reciclarse al ritmo que procede ahora la fotosíntesis. Cabe, por último, que disminuyan la cantidad y la actividad de la RuBP-carboxilasa.





2. DISTINTA FIJACION DEL CARBONO según se trate de especies C_3 o C_4. Unas y otras tienen células de guarda que controlan el intercambio de dióxido de carbono y oxígeno, así como la pérdida de agua. Con la subida de CO_2, disminuyen las pérdidas de agua y aumenta la entrada de ese gas a través de estomas que presentan menores aperturas. Las plantas C_4 poseen una bomba que concentra el CO_2 en la vecindad del centro activo de una enzima crucial para la fotosíntesis, impidiendo la fijación del oxígeno y evitando así la pérdida de energía en fotorrespiración. En un ambiente rico en CO_2, las plantas C_3 que no poseen esta bomba hallan ese dióxido en el centro activo y no pierden la energía asociada a la fotorrespiración.

Aun cuando la tasa fotosintética se acompasara al ritmo de crecimiento del nivel de CO_2, las plantas podrían no acelerar su desarrollo, ni alcanzar mayores tamaños o acumular más sustancias. Se ha demostrado que no siempre se da una relación positiva entre tasa fotosintética por unidad de superficie y crecimiento. Depende de varios factores el crecimiento de la planta; por ejemplo, de la cantidad de superficie foliar disponible para interceptar la luz, así como del modo en que la planta distribuye sus recursos entre las raíces y los tallos, hojas, flores y semillas. Resulta, por tanto, crucial examinar la asignación de los recursos a las diferentes estructuras y funciones de la planta en condiciones de elevada concentración de CO_2.

Sabemos que la fertilidad del hábitat y la disponibilidad hídrica limitan la productividad del ecosistema. Cuando los niveles de nutrientes, agua o luz son bajos, muchas plantas apenas dejan entrever un débil efecto de fertilización por CO_2. Nuestro laboratorio se sirvió de un modelo formado por seis especies de plantas anuales que abundan en los campos abandonados del medio oeste de la nación para analizar la importancia del dióxido de carbono comparada con la de otros recursos ambientales. Descubrimos que el crecimiento de las plantas se veía estrechamente condicionado por la cuantía de luz y nutrientes disponibles. Comparados con estos recursos, los altos niveles de CO_2 traslucían un efecto apagado. Si dejábamos crecer las plantas con poca luz o escasos nutrientes, no experimentaban ningún crecimiento mejorado al subir los niveles de CO_2.

Otros estudios de control han llegado a resultados similares. Walter C. Oechel y sus colegas, de la Universidad estatal de San Diego, demostraron que el duplicar la concentración de CO_2 atmosférico apenas mejoraba la productividad de la tundra, por la posible razón de que muchos nutrientes, retenidos en el suelo permanentemente congelado (permafrost), les eran inaccesibles a las plantas. Con el tiempo, esas plantas C_3 mostraron también una

caída de la tasa de fotosíntesis en dicha atmósfera.

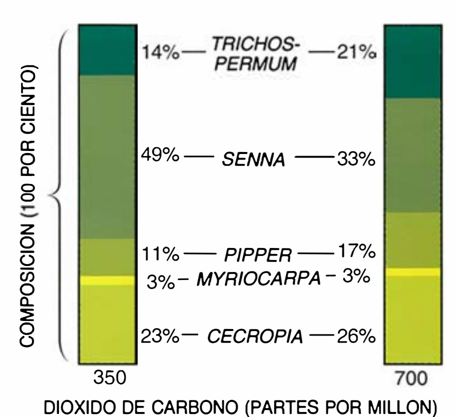
Por contra, los hábitats con abundantes nutrientes podían ofrecer un mayor crecimiento en una atmósfera rica en CO_2. La marisma de la bahía de Chesapeake constituye un paraje insólito: recibe aportes ilimitados de agua y abundantes nutrientes. Componente importante de la vegetación estuarina es una ciperácea de tipo C_3, *Scirpus olneyi*. El grupo encabezado por Bert G. Drake, del centro de investigación medioambiental que la Institución Smithsoniana posee en Edgewater, dejaron allí plantas expuestas a diferentes concentraciones de dióxido de carbono. En consonancia con lo esperado, las parcelas de *Scirpus* crecieron más y más densamente en una atmósfera de 700 partes por millón de CO_2.

Los estudios llevados a cabo en bosques han puesto de manifiesto otro de los factores determinantes de la salud de los futuros ecosistemas: la competencia. Por tratarse de especies C_3, podría predecirse que los árboles experimentarían un mayor efecto de fertilización por CO_2, en particular si abundaran la luz, los nutrientes y el agua. Vistas una a una, las plántulas de las especies arbóreas de los bosques templados de Nueva Inglaterra y el sudeste de los Estados Unidos, así como ciertas especies neotropicales, crecen mejor en un medio enriquecido en CO_2.

Los estudios llevados a cabo con el fin de analizar la competencia, aunque escasos, han puesto de manifiesto que ésta mengua los efectos del CO_2. Ciertos experimentos realizados en dos bosques templados caducifolios y en un bosque tropical húmedo de México demostraron que las comunidades de plántulas no rendían más en una atmósfera enriquecida en CO_2 si crecían juntas las diversas especies. No conocemos bien el motivo de ello, pero cabe imaginar que la competencia por recursos dispersos refrene la respuesta de las plantas a los altos niveles de anhídrido carbónico atmosférico.

Dentro de la misma comunidad vegetal, las hay que se desarrollan mejor que otras. Ocurre así cuando crecen juntas varias especies del bosque tropical húmedo de México; en un ambiente rico en CO_2, las plántulas de *Piper auritum* y *Trichospermum mexicana* arraigaron muy bien, en tanto que las plántulas de otra especie C_3, *Senna multijuga*, apenas tenían éxito.

La atmósfera rica en CO_2 puede dejar a otra categoría de plantas en una posición de desventaja. Las plantas C_4 abarcan muchas gramíneas de las áreas cálidas y secas tropicales y subtropicales e importantes cultivos como el maíz, el sorgo y la caña de azúcar; cuentan con los medios bioquímicos y estructurales necesarios para reducir la fotorrespiración. Las plantas C_4 se sirven de una bomba química que concentra el dióxido de carbono cerca del cloroplasto; redúcese así enormemente la probabilidad de que el oxígeno pugne por el centro activo de la RuBP-carboxilasa. Dado que pierden una cantidad de energía notablemente inferior en la fotorrespiración, estas plantas presentan rendimientos fotosintéticos superiores a los de las especies C_3.



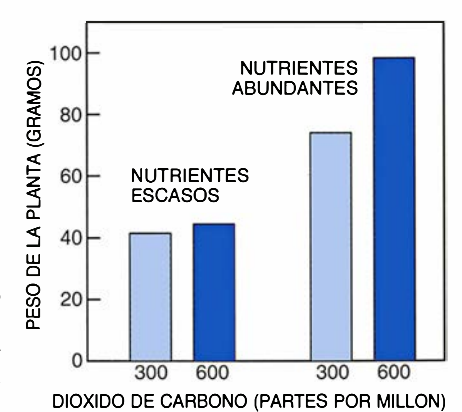


3. CAMBIO DE LA COMPOSICION DE LAS COMUNIDADES VEGETALES con el aumento del nivel de CO_2. Incluso entre las plantas que responden favorablemente a esa subida, unas especies sacan más partido que otras. Tal y como muestra el gráfico de la izquierda, cinco plántulas de especies del bosque tropical húmedo se cultivaron en dióxido de carbono ambiental y en condiciones de dióxido de carbono enriquecido. Al cabo de 120 días, sólo había aumentado la biomasa de *Trichospermum*, *Piper* y *Cecropia* (que aparece en la fotografía).

Mas, conforme aumenta el CO_2, las plantas C_4 pueden verse privadas de esa ventaja. La menor fotorrespiración y pérdida de agua de las especies C_3 mejorarían grandemente su rendimiento en comparación con las plantas C_4. Abundando en esto, el grupo de Boyd R. Strain, de la Universidad de Duke, halló que, a elevadas concentraciones de CO_2, *Aster pilosus*, una herbácea perenne de tipo C_3 que vive en los campos abandonados, crecía mejor que *Andropogon virginicus*, una gramínea C_4. Cuando sembró juntas las dos especies, en un ambiente seco y rico en CO_2, *Aster* dominó sobre *Andropogon*. En otro trabajo, realizado por Douglas R. Carter y Kim M. Peterson, de la Universidad de Clemson, quedó claro también el predominio de las C_3 sobre las plantas C_4, en esas condiciones, y al sembrarlas juntas, en competencia, la gramínea C_3 *Festuca elatior* dominó sobre la C_4 *Sorghum halepense*.

La intrusión competitiva y la escasez de nutrientes no sólo condicionan los ecosistemas naturales (por ejemplo, estuarios y bosques), sino también los ecosistemas más humanizados (verbigracia, explotaciones agrarias). De ahí que no debamos esperar que las cosechas se disparen necesariamente en un mundo más rico en CO_2. A primera vista diríase, de nuevo, que las cosechas sacan partido de tales condiciones atmosféricas. Bruce A. Kimball, del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, revisó más de 700 estudios agronómicos y descubrió que, en promedio, la producción de grano subía un 34 por ciento en condiciones de elevado CO_2; pero otro análisis más fino puso de manifiesto que tales cosechas dependían de la presencia de fertilizantes y de agua, recursos que, con frecuencia, sólo abundan en los campos del mundo desarrollado.

Aunque estos incrementos de producción pueden resultar bienvenidos si tenemos que procurar alimento, vestido y cobijo a los 8000 o 10.000 millones de seres humanos que poblarán el planeta en los próximos 40 a 100 años, los costos de las cosechas pueden alcanzar cifras prohibitivas. Habrá que aportar ingentes cantidades de abonos, plaguicidas y agua de riego si queremos mejores cosechas en un mundo



4. EFECTO DE FERTILIZACION debido al CO_2 y su relación con el aporte de nutrientes que reciba el ecosistema. La biomasa de un grupo de plantas creciendo con elevados niveles de CO_2 no aumenta si no se añaden suficientes nutrientes.



5. MARISMA ESTUARINA de la bahía de Chesapeake, una de las pocas áreas naturales utilizadas para estudiar el modo en que una atmósfera rica en CO_2 altera los ecosistemas. Las plantas crecen en cámaras abiertas por la parte superior con niveles de CO_2 altos (unas 700 partes por millón) y con niveles ambiente (unas 350 partes por millón). Al fondo se aprecia una estación de control.

rico en CO_2. El agua es un recurso caro y limitado. Nos tememos que el coste de esos medios suplementarios, en dinero y en calidad ambiental, constituya una barrera infranqueable. Y la peor situación se dará en los países pobres y atrasados.

Redundará de forma negativa en la agricultura la dispar respuesta de las plantas C_3 y C_4. David T. Patterson, del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, y Elizabeth P. Flint, de la Univesidad de Duke, han demostrado que la productividad relativa de *S. halepense*, planta C_4 que crece como mala hierba en los sembrados, disminuía en presencia de niveles elevados de CO_2 cuando coincidía con la soja, planta de tipo C_3. O a la recíproca: en un ambiente de alta concentración de CO_2, la soja creció mejor que la planta C_4 al cultivarlas juntas. Por contra, mientras que los cultivos de plantas C_3 sacan beneficio de la compañía de malas hierbas C_4, cosechas vitales de especies C_4 (maíz o caña de azúcar) pueden sufrir mermas importantes si coinciden con malas hierbas C_3, en tales condiciones.

Otros organismos que dependen de especies vegetales amenazadas ya sea para procurarse el alimento, cobijarse o reproducirse, podrían hallarse también en peligro. La reducción drástica de la diversidad de las especies puede, a su vez, poner en peligro la integridad de los ecosistemas naturales. Si consideramos, además, que muchas plantas y animales proporcionan una amplia gama de productos para la industria, la agricultura y la medicina, la pérdida de la diversidad acarrearía unas consecuencias dramáticas para la economía y el entorno.

Lo hemos indicado ya: las especies C_3 tienden a superar a las C_4 en una atmósfera rica en CO_2, cambio que arrastra múltiples secuelas. Las especies vegetales que se desenvuelven peor que sus vecinas en un ambiente rico en CO_2 declinan y se vuelven más vulnerables a la extinción. Ciertas plantas C_4 que se encuentran en ecosistemas dominados por plantas C_3 podrían desaparecer si no se las protege de forma adecuada.

Aun cuando la tasa de extinción no se acelerase con las crecientes concentraciones de dióxido de carbono, el carácter cambiante de las comunidades podría alterar por igual la estabilidad de los ecosistemas y el ciclo de los nutrientes. En las fincas rancheras de la Gran Cuenca, Strain de la Universidad de Duke, Stanley D. Smith, de la Universidad de Nevada en las Vegas, y Tom D. Sharkey, de la Universidad de Wisconsin, hallaron que *Bromus tectorum*, mala hierba gramínea, se desarrolló mucho mejor que otras especies en presencia de CO_2 abundante. Dado que *Bromus* favorece el inicio y propagación de los incendios, su potencial incremento en las futuras comunidades vegetales de esos campos podría facilitar la multiplicación de incendios y reforzar la intensidad de los mismos.

El ciclo de los nutrientes puede sufrir cambios bruscos con el aumento de los niveles de CO_2 atmosférico. Por ejemplo, si se altera la abundancia de las leguminosas, lo hará también la concentración de nitrógeno en el suelo. Las leguminosas transforman el nitrógeno atmosférico en nitrato y amonio, formas que resultan asequibles para otras plantas. La reducción del número de leguminosas afectará la fertilidad de los suelos y, en potencia, las especies vegetales aptas para medrar en ellos.

Se modificaría la proporción entre materia vegetal inerte (hojas y tallos) y microorganismos del suelo. Richard J. Norby, del Laboratorio Nacional de Oak Ridge, John Pastor, de la Universidad de Minnesota, y Jerry M. Melillo, del centro de ecosistemas de Woods Hole, llegan a la conclusión de que, si la materia vegetal contiene menos nitrógeno, disminuirá su tasa de descomposición; proceso cuya limitación deberíase al menor desarrollo de las bacterias y hongos por falta de nitrógeno. Se ha demostrado que la hojarasca de las plantas que han crecido en un ambiente rico en CO_2 tiene una menor proporción de nitrógeno en relación con el carbono. Parece que, en respuesta a los altos niveles de CO_2 atmosférico, muchas plantas reducen notablemente la concentración de nitrógeno de sus hojas. Este tipo de ambientes rebajaría la fertilidad de los suelos y del flujo de los nutrientes porque muchos elementos, atrapados en la hojarasca, resultarían inaccesibles a las plantas.

Los cambios en cualidad nutritiva de las hojas pueden reducir la densidad demográfica de las poblaciones de herbívoros y depredadores. La cantidad de nitrógeno y, como consecuencia, la cantidad de proteína presente en las hojas condiciona la cantidad de alimento que consumen los insectos y el número de descendientes que dejan. Por tanto, aunque la cuantía de tejido vegetal creciera en un mundo con

abundante CO_2, disminuiría la palatabilidad de estos tejidos para los insectos herbívoros.

Para compensar la escasa calidad nutritiva de estas plantas, los insectos consumen más hojas. David E. Lincoln y Robert H. Johnson, de la Universidad de Carolina del Sur, han demostrado que los saltamontes y las orugas de varias especies de mariposas consumen bastante más de lo que lo hacen los que se alimentan de plantas cultivadas en condiciones de CO_2 ambiente. Este aumento del consumo por los insectos puede contrarrestar, por sí solo, cualquier supuesto beneficio propugnado por la hipótesis del aumento de cosecha en ambientes con elevada concentración de CO_2.

Las investigaciones realizadas en nuestro laboratorio sugieren que el rendimiento de los insectos herbívoros y el consiguiente tamaño de la población también pueden decrecer con una dieta de este tipo. Alimentadas con llantén sembrado en un ambiente rico en CO_2, las larvas de la mariposa *Junonia coenia* tardan más en desarrollarse y aumenta su mortalidad. Desarrollo larvario más lento significa que llegarán menos individuos al estadio adulto, por quedar vulnerables al ataque de los depredadores y de los parásitos durante más tiempo. Si a ello añadimos que son pocas las larvas que pueden completar su desarrollo antes del inicio de la estación seca o fría, resulta harto probable la caída demográfica de esa mariposa.

Pero si las poblaciones de insectos herbívoros pierden efectivos en un mundo rico en CO_2, habrá muchos depredadores para menos presas. Y deberán reconfigurarse un sinnúmero de relaciones ecológicas. Algunos insectos depredadores, por ejemplo, controlan otras plagas de insectos que perjudican a ciertos cultivos. Se ha comprobado que el desarrollo de las plantas y los tiempos de floración se ven alterados, a menudo de modo imprevisible, por las elevadas concentraciones de CO_2. La modificación de los tiempos de floración puede, a su vez, alterar la polinización al provocar una asincronía entre el momento de máxima floración y el de máxima abundancia del polinizador.

Aunque los cambios del orden de un ecosistema provocados por el aumento del CO_2 sean negativos, se divisa, al menos, una excepción. La asociación entre plantas y simbiontes de la raíz, tales como bacterias fijadoras de nitrógeno y hongos micorrízicos, podría reforzarse en el futuro. En presencia de mayores concentraciones de CO_2 habrá mayor producción de hidratos de carbono, prestos a inducir el crecimiento de los simbiontes radiculares. La mayor abundancia de estos simbiontes puede contribuir a la expansión de los hábitats de las plantas al permitirles sobrevivir en ambientes que anteriormente les resultaban hostiles.

Pero emegerían otros factores relacionados con el cambio atmosférico dispuestos a poner sordina a tales ventajas. Margaret B. Davis, de la Universidad de Minnesota, Thompson Webb, de la Universidad Brown, y varios investigadores europeos han demostrado que, siguiendo la retirada de los hielos glaciales y el aumento de la temperatura, muchos árboles acometieron una lenta migración hacia el norte. Cambios climáticos similares e inducidos por fuentes antropogénicas sucederían de 10 a 100 veces más deprisa que el ritmo de calentamiento posglacial.

Los hábitats modernos se ven interrumpidos por carreteras y otras construcciones públicas que oponen una barrera artificial a la migración. Por tanto, a pesar del aumento del tamaño de sus poblaciones y de la potenciación de los simbiontes radiculares, muchas especies arbóreas no podrán avan-

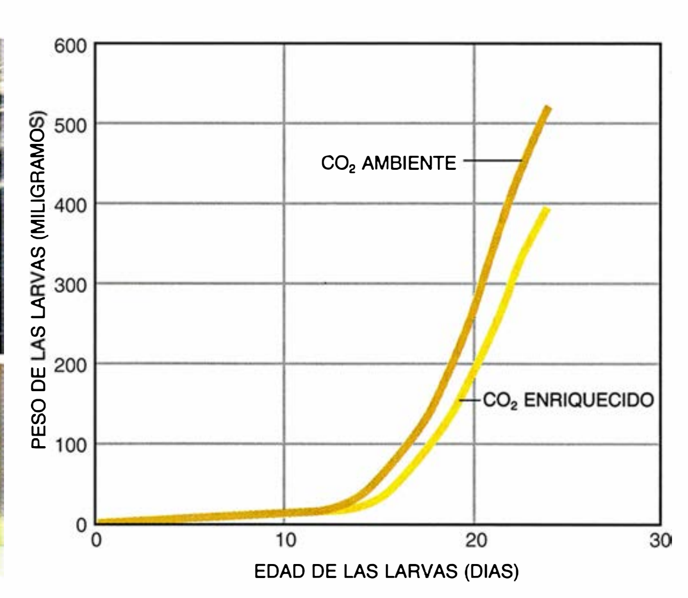




6. AMBIENTES CON ALTA CONCENTRACION de CO_2: aceleran el crecimiento y floración de algunas plantas, así como su senescencia. Las plantas de la izquierda crecieron durante cerca de dos meses en condiciones de CO_2 próximas a las del ambiente, el equivalente a 300 partes por millón. Las plantas de la derecha se cultivaron en un ambiente con elevada concentración de CO_2, unas 900 partes por millón. A diferencia de las plantas que crecieron en una atmósfera normal, las hojas de las plantas más altas del fondo (*Abutilon*), cultivadas en concentración elevada, ya comienzan a amarillear; las plantas del centro (*Datura*) y del primer plano (*Phlox*) han florecido más intensamente.







7. LA MARIPOSA OJO DE DRAGON es uno de los insectos herbívoros que pueden verse afectados negativamente por una atmósfera con elevado CO_2. Tal y como se muestra en el gráfico de la derecha, las orugas de la mariposa (*Junonia coenia*) crecen más lentamente cuando se alimentan de llantén cultivado en ambiente enriquecido en CO_2 (*amarillo*) que cuando viven de llantén cultivado en condiciones ambientales (*naranja*). Por culpa de ello habrá menos integrantes en futuras poblaciones y menguará la fuente de alimento de los animales que depredan estos insectos.

zar, con suficiente rapidez, hacia climas adecuados. Es posible que muchos bosques desaparezcan y sean sustituidos por plantas herbáceas inútiles.

Resulta evidente que el aumento de CO_2 traerá consecuencias de alcance global. No está menos claro que el efecto de fertilización por el CO_2 ha dejado de considerarse garantía de un futuro verde y cosechas copiosas. Pero, ¿qué pasará con el potencial de la vida vegetal para servir de sumidero de CO_2? ¿Podrán mitigar los procesos vegetales el futuro efecto invernadero retirando más CO_2 del aire?

La tasa y la severidad del cambio climático global que pueda darse depende de la tasa con que se acumula CO_2 antropogénico en la atmósfera. George M. Woodwell y Richard A. Houghton, de la Institución Oceanográfica de Woods Hole, estiman que la quema de los combustible fósiles supone un incremento anual de unos cinco mil millones de toneladas métricas de CO_2 en la atmósfera y que la deforestación supone un aporte suplementario de mil millones a dos mil millones de toneladas métricas. Sin embargo, el incremento neto anual de CO_2 en la atmósfera es de sólo tres mil millones de toneladas métricas.

Se han avanzado varias hipótesis para justificar esa diferencia de tres mil millones de toneladas métricas de carbono. Así, se supuso en un comienzo que los procesos que tienen lugar en los océanos —la fotosíntesis de las algas o la disolución directa del CO_2 en el agua salada— cuadraban el balance. Se cuestionó la misma intervención de la vegetación terrestre en la absorción de ese ingente volumen de CO_2 porque unas investigaciones asignaban a la cubierta vegetal el papel de fuente y otras el de sumidero neto de CO_2.

Cálculos recientes de Pieter P. Tans, de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica, Inez Y. Fung, del Instituto Goddard de la Administración Nacional Aeronáutica y del Espacio, y Taro Takahashi, de la Universidad de Columbia, cifran en 3400 millones de toneladas métricas las absorbidas por los ecosistemas terrestres de las regiones templadas del hemisferio norte. Estas conclusiones se establecieron comparando las concentraciones observadas de CO_2 en la atmósfera y las presiones parciales de este gas en las aguas superficiales de los océanos.

Si las tasas de fotosíntesis y acumulación de carbono aumentan en presencia de elevada concentración de CO_2, habrá ecosistemas que limiten el incremento de la concentración de CO_2 atmosférico y contribuyan a frenar el ritmo de cambio climático potencial. Apenas si empezamos a entender el camino que seguirán los ecosistemas terrestres, en particular los bosques que acumulan la mayor parte del carbono de la biosfera, con un mundo enriquecido en CO_2. Y aunque queda mucho por saber, ciertos trabajos sugieren ya que la complejidad del ciclo del dióxido de carbono y los cambios asociados al efecto invernadero no aumentarán la capacidad de los ecosistemas terrestres para absorber el CO_2.

W. Dwight Billings, de la Duke, simulando el efecto de invernadero en condiciones de tundra con suelos inundados, demostró que se absorbía menos CO_2. El crecimiento de las plantas se avivó en estas condiciones gracias a la suavidad de las temperaturas, el aumento de CO_2 y la liberación de nutrientes suplementarios que tiene lugar al aumentar la profundidad de los suelos de la tundra. Ahora bien, conforme el permafrost va fundiéndose, queda expuesta una mayor cantidad de turba (materia vegetal muerta y acumulada) a la acción de los descomponedores, lo que a su vez libera más CO_2 a la atmósfera. Billings dedujo que, si la temperatura estival aumentara 4 grados Celsius, la tundra liberaría un 50 por ciento más de su CO_2, a pesar del mayor desarrollo de las plantas.

En un mundo más cálido, el mayor vigor y porte adquirido por las plantas, que contribuye a absorber CO_2 de la atmósfera, no basta para compensar la aceleración experimentada por las tasas de descomposición, observaciones éstas muy pertinentes si no olvidamos que los ambientes situados en latitudes elevadas (la tundra) son los que verosímilmente registrarán un crecimiento mayor de la temperatura.

Tras más de diez años de investigación podemos afirmar que resulta evidente la incidencia de una atmósfera rica en CO_2, con efectos directos y drásticos en la composición y funcionamiento de los ecosistemas. De acuerdo con los datos más sólidos no hay razón para mostrarse optimista acerca de la respuesta de los ecosistemas a un entorno en transformación. Una atmósfera de este tipo no ayudará a aliviar los problemas demográficos y ambientales que tiene planteados el pla-

neta; más aún: esa atmósfera puede inducir modificaciones climáticas capaces de socavar la integridad de los sistemas biológicos de los que depende el *Homo sapiens*.

Para conjurar el riesgo asociado a los niveles crecientes de CO_2 atmosférico, compete a la sociedad limitar la tasa de emisiones antropogénicas y, a los científicos, dilucidar la influencia del cambio climático antropogénico en la atmósfera, los océanos y los continentes.

Los aspectos ecológicos de esta investigación deben incluir determinaciones precisas del modo en que una atmósfera rica en CO_2 alterará la estructura de la comunidad y la productividad de los ecosistemas. Habrá que atender, asimismo, a las respuestas de las comunidades de plantas, herbívoros y polinizadores ante la combinación de elevados niveles de CO_2 y altas temperaturas, lluvia ácida y concentraciones crecientes de elementos contaminantes. Ese empeño investigador puede ayudar a salir al paso de cualquier sorpresa provocada por la sinergia de las transformaciones que sufre nuestra atmósfera.

Si queremos formular una política social y económica racional para adaptarnos a los cambios ambientales, tendremos que conocer mucho mejor los cambios que experimentarán los sistemas naturales y los creados por el hombre con la elevación del nivel del CO_2 atmosférico. Los sueños acerca de los campos fértiles y regados que cultivamos en los invernaderos no deben distraernos de las realidades científicas de la vida en nuestra atmósfera más rica en CO_2 y, quizás, más caliente.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

DIRECT EFFECTS OF INCREASING CARBON DIOXIDE ON VEGETATION. Dirigido por B. R. Strain y J. D. Cure. Departamento de Energía de los Estados Unidos. 1985.

THE GREENHOUSE EFFECT AND NATURE RESERVES. R. L. Peters y J. D. S. Darling en *Bioscience*, vol. 35, n.º 11, págs. 707-717; diciembre de 1985.

CAMBIO CLIMATICO GLOBAL. Richard A. Houghton y George M. Woodwell en *Investigación y Ciencia*, n.º 153, págs. 8-17; junio de 1989.

UN CLIMA CAMBIANTE. Stephen H. Schneider en *Investigación y Ciencia*, n.º 158, págs. 32-41; noviembre de 1989.

CLIMATE CHANGE: THE IPCC SCIENTIFIC ASSESSMENT. Dirigido por J. T. Houghton, G. J. Jenkins y J. J. Ephraums. Cambridge University Press, 1990.

THE RESPONSE OF NATURAL ECOSYSTEMS TO THE RISING GLOBAL CO_2 LEVEL. F. A. Bazzaz en *Annual Review of Ecology and Systematics*, vol. 21, págs. 167-196; 1990.

El caos cuántico

¿Mora el caos en el suave y ondulatorio mundo cuántico? Los trabajos recientes respaldan una respuesta afirmativa: los síntomas del caos aparecen incluso en las representaciones ondulatorias de los niveles energéticos

Martin C. Gutzwiller

Einstein escribió en 1917 un artículo del que nadie habló durante 40 años. Planteaba allí una cuestión que los físicos no se formularían hasta muy recientemente: ¿Qué función desempeñaría el caos clásico, agazapado tras múltiples fenómenos de nuestro entorno, en la mecánica cuántica, la teoría que describe el mundo atómico y el subatómico? Cierto es que los efectos del caos clásico se han venido observando desde hace siglos; Kepler sabía del movimiento irregular de la Luna en torno a la Tierra y Newton se quejaba amargamente del fenómeno. A finales del siglo XIX, George William Hill, astrónomo norteamericano, demostró que tal irregularidad debíase a la fuerza gravitatoria del Sol. Poco después, Henri Poincaré, célebre físico, astrónomo y matemático francés, conjeturó que el movimiento de la Luna era un caso benigno de una enfermedad congénita que afectaba a casi todo. A largo plazo, observó Poincaré, la mayoría de los sistemas dinámicos no muestran una regularidad discernible ni un esquema repetitivo. El comportamiento de un sistema, por sencillo que éste sea, depende tanto de sus condiciones iniciales que el resultado final no podrá determinarse de antemano (véase la sección "Taller y laboratorio" en este mismo número).

Por la misma época en que se desarrollaba el trabajo seminal de Poincaré sobre el caos clásico, Max Planck iniciaba otra revolución que llevaría a la moderna teoría de la mecánica cuántica. Volvieron a estudiarse los sistemas sencillos de los que Newton se había ocupado, pero esta vez a escala atómica. El equivalente cuántico del humilde péndulo es el láser; las balas de cañón del mundo atómico constan de haces de protones o electrones, y la rueda giratoria es el electrón con espín (la base de las cintas magnéticas). El propio sistema solar se refleja en cada átomo de la tabla periódica de los elementos.

Quizá la característica más sorprendente del mundo cuántico resida en su naturaleza suave y ondulatoria, rasgo que nos conduce a la pregunta de qué ocurre con el caos cuando pasamos del mundo clásico al cuántico. ¿Cómo se reconcilia el carácter extremadamente irregular del caos clásico con la naturaleza suave y ondulatoria de los fenómenos atómicos? ¿Existe el caos en el mundo cuántico?

Los trabajos preliminares parecen demostrar que sí. El caos se encuentra en la distribución de los niveles energéticos de ciertos sistemas atómicos; incluso parece esconderse en los esquemas ondulatorios asociados a estos niveles. También se da cuando los electrones chocan con moléculas pequeñas. Pero debo aclarar, desde un comienzo, que la expresión "caos cuántico" se aplica mejor a la descripción de un rompecabezas que a la resolución de un problema bien planteado.

Para abordar con rigor el caos cuántico, pudiera ayudarnos cierta imagen de mayor cobertura. Todos nuestros debates teóricos relativos a la mecánica se agrupan, algo artificialmente, en tres compartimentos (*véase la figura 2*), aunque la naturaleza no admite ninguna clasificación de ese tenor.

La mecánica clásica elemental ocupa el primer compartimento. Esta caja contiene todos los sistemas claros y limpios que exhiben un comportamiento sencillo y regular; los designaré con la R de regular. Hay instalado también en R un instrumento matemático muy refinado, la teoría de perturbaciones; se emplea para calcular los efectos de pequeñas interacciones y distorsiones ajenas, verbigracia, la influencia del Sol en el movimiento que sigue la Luna en torno a la Tierra. Con el auxilio de la teoría de perturbaciones, comprendemos buena parte de la física operando leves modificaciones de los sistemas regulares. Sin embargo, la realidad es mucho más complicada; los sistemas caóticos, que caen fuera del ámbito de la teoría de perturbaciones, constituyen el segundo compartimento.

Debemos a Poincaré el primer análisis detallado de los sistemas del segundo compartimento; en su honor, lo designaré con la letra P. Esa caja está llena de sistemas dinámicos caóticos que son el pan y la sal de la ciencia; y, entre tales sistemas, se cuentan todos los problemas fundamentales de la mecánica, empezando por el de la interacción entre tres cuerpos (no sólo dos): Tierra, Luna y Sol, los tres átomos de una molécula de agua o los tres quarks del protón, por citar tres ejemplos.

La mecánica cuántica, tal como se ha venido aplicando durante casi 90 años, pertenece al tercer compartimento, designado con una Q. Después del trabajo pionero de Planck, Einstein y Niels Bohr, recibió su forma definitiva en un brevísimo intervalo de cuatro años, a contar desde 1924. Las contribuciones básicas de Louis de Broglie, Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger, Max Born, Wolfgang Pauli y Paul Dirac han resistido la prueba del laboratorio sin el menor fallo. La cuántica confiere a la física un marco matemático que, en opinión de Dirac, ha dado por fruto un conocimiento profundo de "la mayor parte de la física y de la química entera". Pero aunque los físicos y químicos hayan aprendido a resolver problemas específicos de la mecánica cuántica, no han llegado todavía a captar las increíbles sutilezas

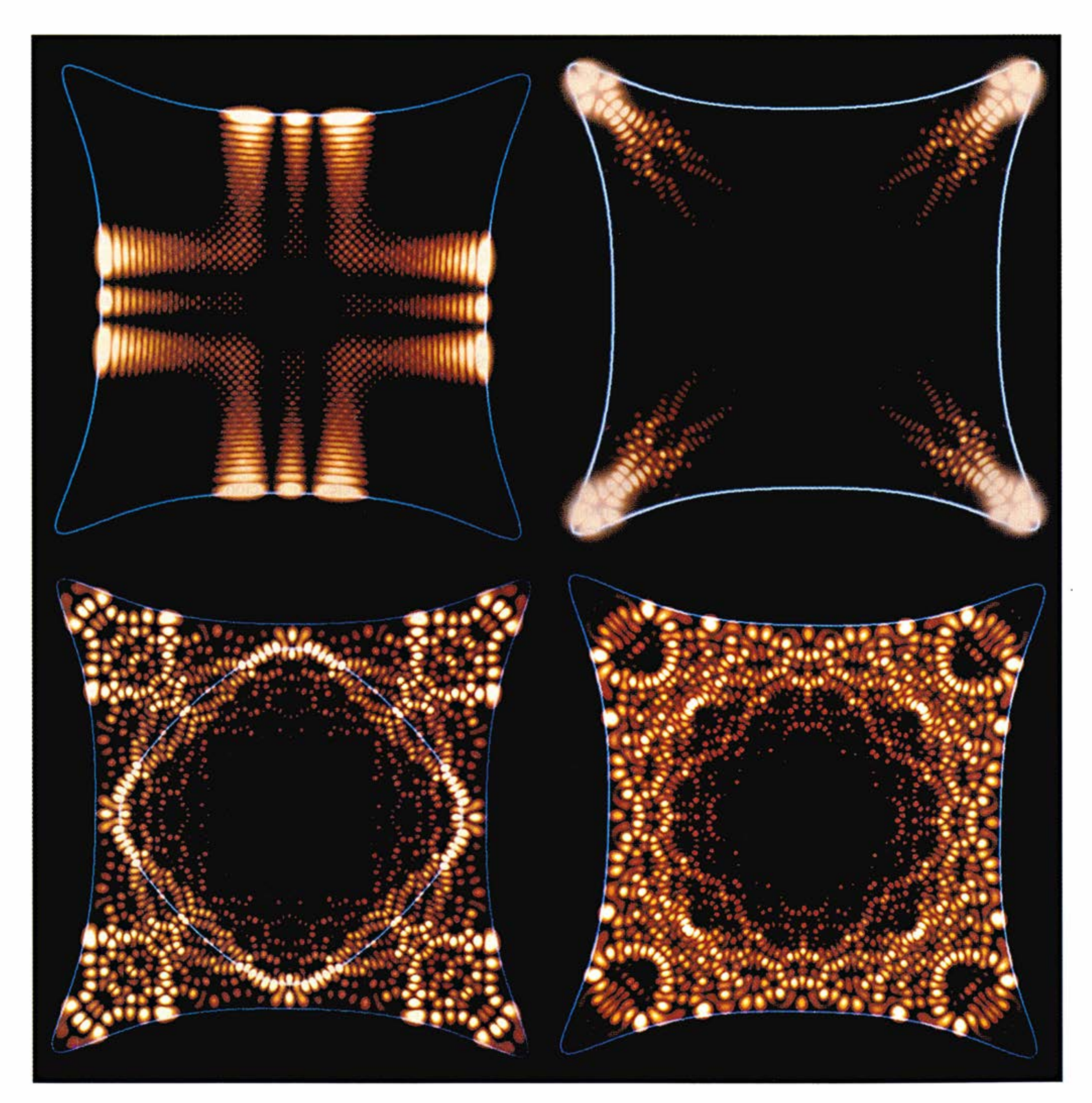
MARTIN C. GUTZWILLER pertenece a la plantilla del centro de investigación Thomas J. Watson que la empresa IBM posee en Yorktown Heights, labor que compagina con la de profesor de metalurgia en la Escuela de Ingeniería de la Universidad de Columbia. Suizo de nacimiento, inició su formación superior en el Instituto Politécnico Federal de Zurich, que completó con la obtención del doctorado en física por la Universidad de Kansas en 1953. Está en IBM desde 1960, donde ha trabajado en la interacción de electrones en metales y, actualmente, en las relaciones entre la mecánica clásica y la cuántica.

de ese reino. Estas sutilezas quedan bastante lejos de los problemas, difíciles y teóricos, relacionados con la interpretación de la mecánica cuántica.

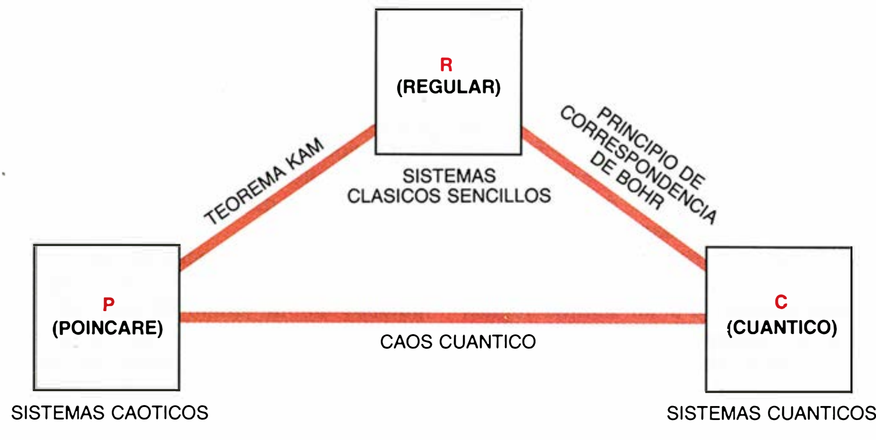
Los tres recuadros, R (sistemas clásicos sencillos), P (sistemas caóticos clásicos) y Q (sistemas cuánticos), se hallan ligados a través de varios puentes de conexión. La línea tendida entre R y Q se denomina principio de correspondencia de Bohr. Con sobrada razón mantiene ese principio que la mecánica clásica debe estar contenida en la mecánica cuántica en el límite en que los objetos son mucho mayores que el tamaño de los átomos. La principal conexión entre R y P es el teorema de Kolmogorov-Arnold-Moser (KAM). Este teorema proporciona un instrumento potente para calcular qué parte de la estructura de un sistema regular persiste cuando se introduce una pequeña perturbación; el teorema permite, pues, identificar qué perturbaciones arrastrarán a un sistema regular hacia un comportamiento caótico.

El caos cuántico tiene así que ver con el establecimiento de la relación entre el recuadro P (sistemas caóticos) y el recuadro Q (sistemas cuánticos). Para tender ese puente conviene introducir la noción de espacio físico. Por sorprendente que parezca, esa idea, muy explotada hoy por los expertos en sistemas dinámicos, arranca de Newton.

La noción de espacio físico la encontramos ya en los *Principios matemáticos de la filosofía natural* de Newton, publicados en 1687. En la segunda definición del primer capítulo,



1. ESTADOS ESTACIONARIOS, o estructuras ondulatorias, asociados a los niveles energéticos de un átomo de Rydberg (un átomo de hidrógeno muy excitado) en un campo magnético intenso: presentan cualidades caóticas. Los estados que se exhiben en las imágenes superiores parecen regulares; las dos inferiores son caóticas. El estado que se muestra abajo a la izquierda yace en una órbita periódica. La imagen inferior derecha es difícil de interpretar, excepto por las cuatro simetrías especulares con respecto a las líneas vertical, horizontal y las dos diagonales.



2. DIVISION TRADICIONAL DE LA MECANICA en los tres compartimentos que se indican y que se relacionan mediante varias conexiones; división que es artificial. El caos cuántico intenta establecer la relación entre los recuadros, o cajas, P y Q.

titulado "Definiciones", Newton afirma (traducido del latín original en 1729): "La cantidad de movimiento es la medida del mismo, que surge conjuntamente de la velocidad y de la cantidad de materia." Newton quiere decir que, para cada objeto, existe una magnitud, llamada cantidad de movimiento (el "linear momentum" de los autores ingleses), que es el producto de masa por velocidad.

Newton expone sus leyes del movimiento en el segundo capítulo, titulado "Axiomas o leyes del movimiento". La segunda ley establece que el cambio del movimiento es proporcional a la fuerza motora aplicada. Newton relaciona la fuerza con el cambio de la cantidad de movimiento (no con la aceleración, tal como hacen muchos libros de texto).

La cantidad de movimiento constituye una de las dos magnitudes que, en conjunto, dan la información completa acerca de un sistema dinámico en cualquier instante. La otra cantidad es la posición, que determina la intensidad y dirección de la fuerza. La intuición de Newton relativa a la naturaleza dual de la cantidad de movimiento y la posición se asentó sobre bases más sólidas unos 150 años después, con las aportaciones de los matemáticos William Rowan Hamilton y Karl Gustav Jacob Jacobi. El tándem posición y cantidad de movimiento deja de contemplarse inmerso en el viejo espacio euclídeo de tres dimensiones para ser objeto de tratamiento en el espacio fásico dotado de seis dimensiones, tres para la posición y tres para la cantidad de movimiento.

Desde una óptica matemática, la introducción del espacio fásico marcó un hito, pero representa un serio contratiempo desde el punto de vista de la intuición humana. ¿Quién puede representarse en imágenes seis dimensiones? Para nuestra fortuna, en algunos casos el espacio fásico puede reducirse a tres o incluso a dos dimensiones.

Se da esa reducción, por ejemplo, cuando examinamos el comportamiento de un átomo de hidrógeno en un campo magnético intenso. Desde hace tiempo, el átomo de hidrógeno se ha convertido en un sistema ideal por su sencillez: un único electrón se mueve en torno a un solo protón; mas el movimiento clásico del electrón se torna caótico cuando se conecta el campo magnético. ¿Cómo podemos pretender entender la física si no podemos explicar este fenómeno básico?

En condiciones normales, el electrón de un átomo de hidrógeno se halla fuertemente ligado al protón. El comportamiento del átomo está regido por la mecánica cuántica. El átomo no puede tomar cualquier energía arbitraria; sólo puede tener energías discretas, o cuantizadas. A bajas energías, los valores permitidos guardan cierta separación. Cuando aumenta la energía del átomo, éste adquiere un tamaño mayor, porque el electrón se mueve más alejado del protón, y las energías permitidas están más juntas. A altas energías (aunque no altísimas, para evitar que el átomo pierda su electrón), las energías permitidas se acercan tanto que vienen a formar un continuo, lo que nos faculta para aplicar las reglas de la mecánica clásica.

El átomo así excitado se denomina átomo de Rydberg, que, por ocupar el espacio comprendido entre el mundo cuántico y el clásico, deviene el candidato ideal para explorar el principio de correspondencia de Bohr que conecta las cajas Q (fenómenos cuánticos) y R (fenómenos clásicos). Si se lograra que un átomo de Rydberg presentara un comportamiento caótico en el sentido clásico, podría ofrecernos alguna pista acerca de la naturaleza del caos cuántico y, en consecuencia, arrojar luz sobre la zona intermedia entre los recuadros Q y P (fenómenos caóticos).

El átomo de Rydberg presenta un comportamiento caótico en un campo magnético intenso. Para percibirlo, sin embargo, hemos de reducir la dimensión del espacio fásico. Con ese propósito, empezaremos por observar que el campo magnético aplicado define un eje de simetría a través del átomo. El movimiento del electrón se desarrolla en un plano bidimensional, por lo que podemos prescindir del movimiento en torno al eje; sólo interesan la distancia a lo largo del eje y la lejanía respecto a dicho eje. La simetría del movimiento reduce las seis dimensiones del espacio fásico a cuatro.

Ninguna fuerza exterior produce trabajo sobre el electrón, lo que facilita nuestro proyecto. Significa ello que la energía total no cambia con el tiempo. Si centramos la atención en un valor de la energía determinado, podemos tomar una capa energética, una suerte de rebanada tridimensional en el espacio fásico de cuatro dimensiones. La capa energética permite contemplar los bucles y giros del electrón; y en verdad se percibe una rara escultura de alambres retorcidos. Esa imagen resultante podemos simplificarla todavía más con un recurso ingenioso que se le ocurrió al mismo Poincaré. Sugirió tomar un plano bidimensional fijo (lo que hoy llamamos sección de Poincaré o una superficie de sección) a través de la capa energética y observar los puntos por donde la trayectoria corta la superficie. La sección de Poincaré reduce la escultura de alambre a una secuencia de puntos en un plano ordinario.

En la figura 3 se muestra una sección de Poincaré para un átomo de hidrógeno muy excitado en un campo magnético intenso. Las regiones del espacio fásico en las que están dispersos los puntos indican el comportamiento caótico. Tal dispersión evidencia un signo claro de caos clásico y permite asignar los sistemas al recuadro P o al recuadro R.

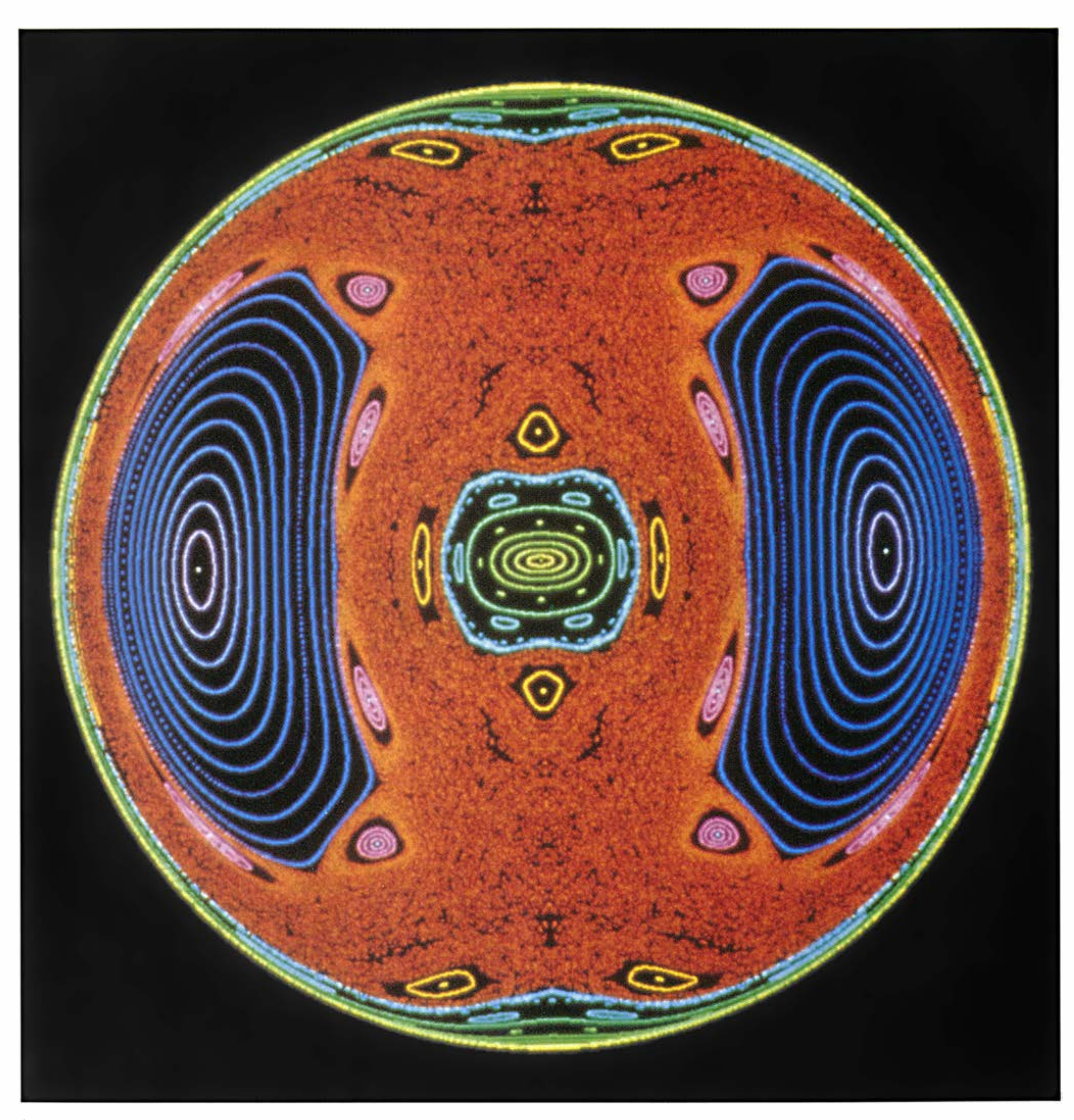
Veamos qué información aporta el átomo de Rydberg sobre la relación entre los recuadros P y Q. Dije antes que uno de los rasgos de los sistemas mecánico-cuánticos eran sus niveles energéticos cuantizados; por ellos debemos empezar nuestra búsqueda del caos cuántico. Ahora bien, el caos no se insinúa en ningún nivel energético determinado: se deja ver en el espectro, o distribución, de los niveles. De manera un tanto paradójica, en un sistema cuántico no caótico los niveles energéticos se distribuyen al azar y sin correlacionarse, mientras que los niveles energéticos de un sistema cuántico caótico muestran fuertes correlaciones (*figura 4*).

Los niveles de un sistema regular aparecen juntos a menudo porque éste

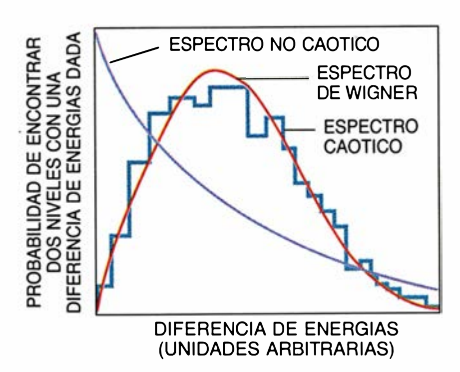
se compone de subsistemas menores que están completamente desacoplados. Diríase, por contra, que los niveles energéticos de un sistema caótico son conscientes y celosos de su identidad, e intentan mantener una distancia mutua de seguridad. El sistema caótico no puede descomponerse; el movimiento según un eje de coordenadas se halla siempre acoplado con lo que sucede según el otro eje.

El espectro de un sistema cuántico caótico fue sugerido ya por Eugene P. Wigner, otro de los maestros de primera hora de la mecánica cuántica. Lo mismo que otros, él observó también que la física nuclear carece de la fundamentación sólida de que gozan la física atómica y la molecular. No acabamos de entender del todo el origen de la fuerza nuclear. E inquirió, por consiguiente, si las propiedades estadísticas de los espectros nucleares podrían deducirse de la hipótesis según la cual muchos parámetros del problema poseían valores definidos, aunque desconocidos. Este punto de partida bastante vago le permitió encontrar la fórmula más probable de la distribución. Oriol Bohigas y Marie-Joya Giannoni, del Instituto de Física Nuclear de Orsay, demostraron que la distribución de Wigner era exactamente la que se encuentra en el espectro de un sistema dinámico caótico.

Pero no parece que el caos se limite a la distribución de los niveles energéticos cuánticos, sino que sigue su camino por la naturaleza ondulatoria del mundo cuántico. La posición del electrón en el átomo de hidrógeno se ilustra a través de un representación ondulatoria. No puede localizarse en el espacio; viene a ser como una mancha



3. SECCION DE POINCARE DE UN ATOMO DE HIDROGENO en un campo magnético intenso. Tiene regiones (*color naranja*) donde los puntos de la trayectoria del electrón se dispersan con violencia, índice de un comportamiento caótico. La sección es una rebanada del espacio fásico, un espacio abstracto que en general tiene seis dimensiones: las tres de la posición de una partícula y tres de la cantidad de movimiento de la misma.



4. ESPECTRO ENERGETICO, o distribución de los niveles de energía. El espectro de los sistemas cuánticos caóticos difiere notablemente del que muestran los no caóticos. En el caso de un sistema no caótico, por ejemplo un ion molécula de hidrógeno (H_2^+), la probabilidad de encontrar dos niveles energéticos cercanos es bastante elevada. En el caso de un sistema caótico, verbigracia un átomo de Rydberg en un campo magnético intenso, la probabilidad es baja. El espectro caótico se parece mucho al espectro nuclear típico deducido hace muchos años por Eugene P. Wigner.

nebulosa que merodea por la vecindad del protón. Asociado con cada nivel energético permitido hay un estado estacionario, una representación ondulatoria que no cambia con el tiempo. El estado estacionario se acerca bastante a lo que sería un patrón vibracional de una membrana estirada sobre un bastidor rígido (un tambor).

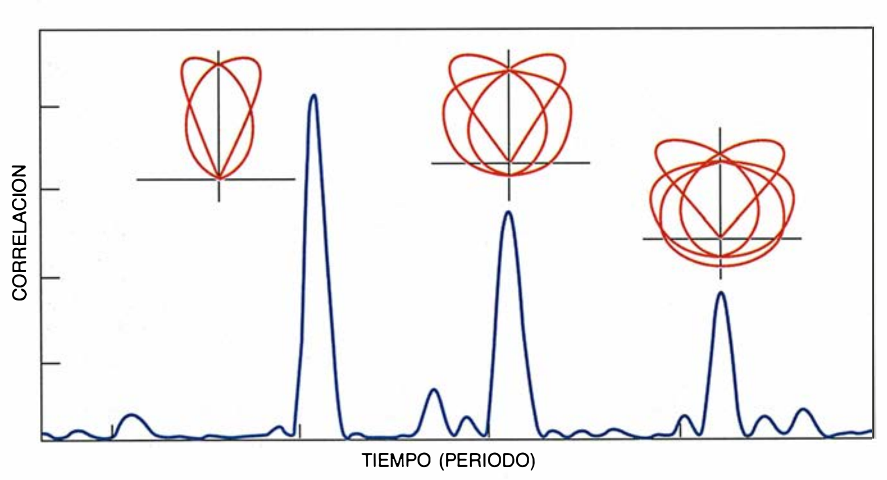
Los estados estacionarios de un sistema caótico poseen una estructura interesante, según demostrara ya Eric Heller, de la Universidad de Washington, a comienzos de la década de los ochenta. Ayudado por sus alumnos calculó una serie de estados estacionarios de una cavidad bidimensional en forma de cancha deportiva. Se sabía que el problema correspondiente de la mecánica clásica era caótico, ya que cualquier trayectoria cubre rápidamente la mayor parte del terreno disponible de manera bastante uniforme. Semejante comportamiento sugiere que los estados estacionarios podrían también parecer aleatorios, es decir, sin orden ni concierto. Pero Heller descubrió que la mayoría de estados estacionarios se concentraban en torno a canales estrechos que dibujan formas sencillas por la cancha; bautizó sus canales con el nombre de "cicatrices" (*véase la figura 6*). Se aprecia una estructura similar en los estados estacionarios de un átomo de hidrógeno en un campo magnético intenso. La suavidad de las ondulaciones cuánticas se conserva punto a punto, pero, en cuanto se retrocede para ver la imagen entera, emerge la huella del caos.

Podemos conectar la signatura caótica del espectro energético con la mecánica clásica. Einstein nos ofreció en su trabajo de 1917 una pista para la prescripción. Examinó el espacio fásico de un sistema regular del recuadro R y describió su geometría llena de superficies en forma de roscos; el movimiento del sistema corresponde a la trayectoria de un punto sobre la superficie de un rosco determinado. La trayectoria dibuja un recorrido regular por la superficie del rosco, aunque no se cierra necesariamente.

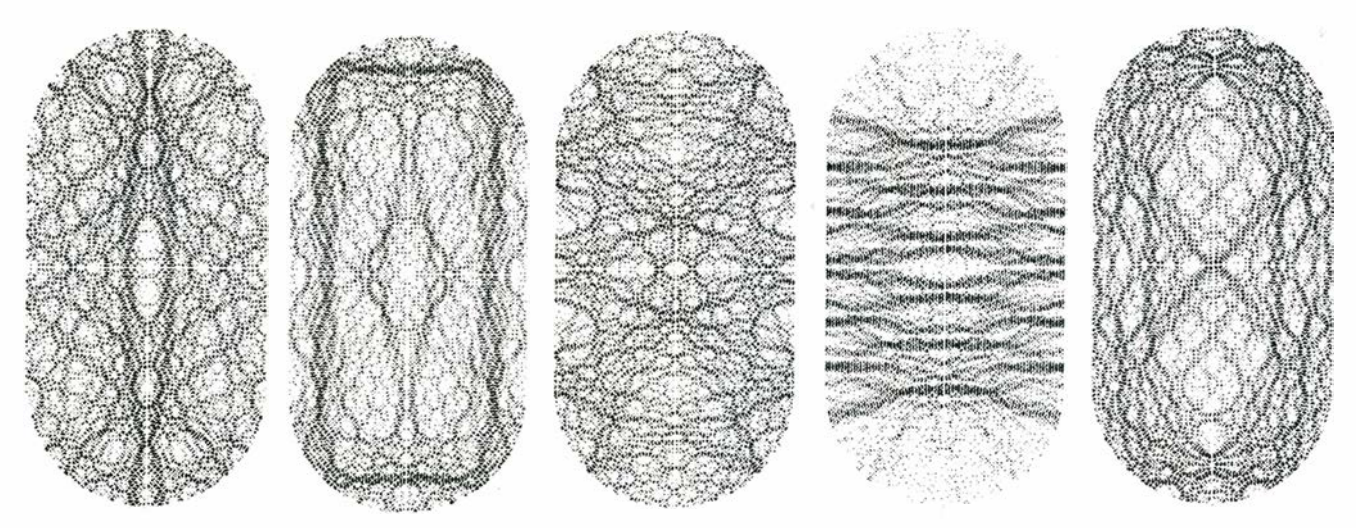
En la exposición de Einstein, no entraña mayor dificultad aplicar el principio de correspondencia de Bohr para encontrar los niveles energéticos del sistema mecánico-cuántico análogo. Las únicas trayectorias que pueden darse en la naturaleza son aquellas en las que la sección transversal del rosco encierra un área igual a un múltiplo entero de la constante de Planck h (2π veces el cuanto fundamental del momento angular, que tiene unidades de cantidad de movimiento por longitud). Ahora bien, sucede que el múltiplo entero es precisamente el número que especifica el nivel energético correspondiente en el sistema cuántico.

Pero, como ya lo percibiera con claridad Einstein, su método no puede aplicarse si el sistema es caótico, ya que la trayectoria no descansa sobre un rosco, y no existe un área natural que encierre un múltiplo entero de la constante de Planck. Debe buscarse un nuevo método que explique la distribución de los niveles energéticos de la mecánica cuántica en términos de las órbitas caóticas de la mecánica clásica.

¿Qué aspectos de la trayectoria que nos describe la mecánica clásica nos ayudarán a entender el caos cuántico? El análisis de Hill acerca de la irregularidad, de la órbita lunar, provocada por la presencia del Sol apunta una pista. Su trabajo constituye el primer ejemplo en que una órbita periódica determinada es el piñol de un difícil problema mecánico. (Una órbita periódica es como una pista cerrada por donde debe correr el sistema; hay muchas, aunque son aisladas e inestables.) La inspiración puede también remontarse a Poincaré, quien resaltó la importancia general de las órbitas periódicas. Al principio de *Los nuevos métodos de mecánica celeste*, obra en



5. ABSORCION DE LUZ por un átomo de hidrógeno en un campo magnético intenso; aunque parece variar al azar en función de la energía (*arriba*), el análisis de Fourier de los datos nos revela una estructura distinta (*abajo*). Cada pico de la parte inferior está asociado a una órbita periódica clásica determinada (indicada junto al pico correspondiente).



6. LA PARTICULA encerrada en una caja en forma de cancha deportiva posee estados estacionarios caóticos. La mayoría de los estados, según ya demostró Eric Heller, de la Universidad de Washington, se concentran en torno a canales estrechos que toman formas sencillas, en cicatriz.

tres volúmenes publicada en 1892, exponía su opinión de que las órbitas periódicas "ofrecen el único resquicio por donde podríamos penetrar en una fortaleza con fama de inexpugnable". El espacio fásico de un sistema caótico puede organizarse, al menos parcialmente, en torno a órbitas periódicas, aun cuando sean a veces bastante difíciles de encontrar.

En 1970 descubrí una manera muy general de extraer información acerca del espectro mecánico-cuántico a partir de una enumeración completa de las órbitas periódicas clásicas. Sin entrar en los recursos matemáticos empleados, sólo diré que el resultado principal del método es una expresión bastante sencilla: una fórmula de traza. El método comienza ya a ser usado por otros; así Michael V. Berry, de la Universidad de Bristol, ha empleado la fórmula para deducir las propiedades estadísticas del espectro.

He aplicado la fórmula de traza para calcular las dos docenas de niveles energéticos más bajos de un electrón en una red semiconductora, cerca de una de las impurezas cuidadosamente controladas. (El semiconductor constituye, sin la menor duda, la base de los maravillosos dispositivos sobre la que se asienta la vida moderna; debido a sus impurezas, la conductividad eléctrica del material se encuentra a mitad de camino entre la de un aislante, así el plástico, y la de un conductor, de cobre por ejemplo.) La trayectoria del electrón puede caracterizarse unívocamente por una serie de símbolos, que tienen una interpretación directa. Se obtiene la serie definiendo un eje a través del semiconductor y anotando cuándo la trayectoria cruza el eje. El cruce hasta el lado "positivo" del eje corresponde al símbolo +; hasta el lado "negativo", al símbolo –.

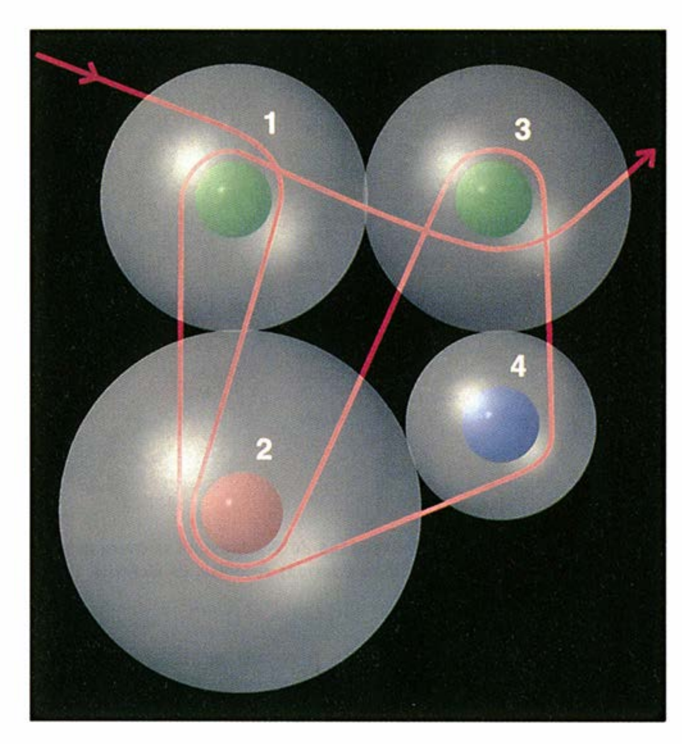
La trayectoria parece entonces exactamente igual a la anotación del lanzamiento de una moneda. Aun cuando se conociera el pasado hasta el mínimo detalle, aun cuando se hubieran registrado todos los cruces, quedaría muchísimo futuro abierto. La secuencia de cruces puede elegirse al azar. Así, una órbita periódica consiste en una serie binaria que se repite; la más sencilla de tales secuencias es (+ –), la siguiente es (+ + –), etcétera. (Dos cruces en una fila que tienen el mismo signo indican que el electrón ha quedado atrapado temporalmente.) Todas las órbitas periódicas se van, pues, numerando y es posible calcular un espectro aproximado con la ayuda de la fórmula de traza. En otras palabras, los niveles energéticos mecánico-cuánticos se obtienen con una aproximación que se basa sólo en magnitudes de la mecánica clásica.

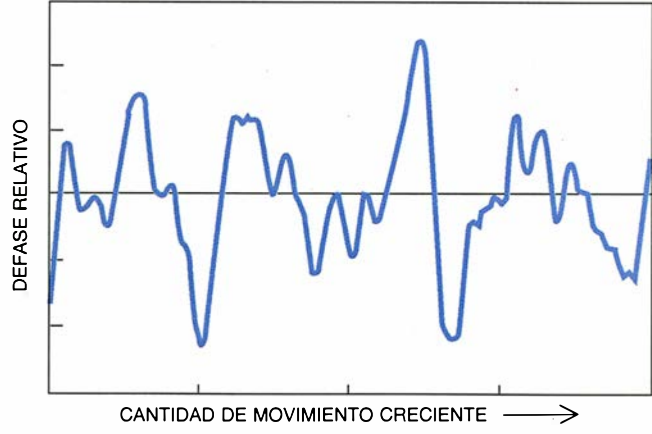
Las órbitas periódicas clásicas y el espectro mecánico-cuántico están estrechamente ligados mediante el proceso matemático denominado análisis de Fourier (véase "La transformación de Fourier", por Ronald N. Bracewell; INVESTIGACION Y CIENCIA, agosto de 1989). Las regularidades escondidas en un conjunto y la frecuencia con la que aparecen vienen determinadas con exactitud por el otro conjunto. Sobre esa idea se apoyó John B. Delos, del Colegio William and Mary, y Dieter Wintgen, del Instituto Max Planck de Física Nuclear de Heidelberg, para interpretar el espectro del átomo de hidrógeno en un campo magnético intenso.

Del trabajo experimental en tales espectros se ha ocupado el grupo de Karl H. Welge, de la Universidad de Bielefeld, quienes han excitado átomos de hidrógeno cerca del punto de ionización en que el electrón se libera del protón. Las energías a las que el átomo absorbe radiación aparecen bastante al azar, pero un análisis de Fourier convierte la maraña de picos en un conjunto de picos nítidamente separados. Con la particularidad de que cada pico corresponde precisamente a una de las varias órbitas periódicas clásicas estándar. La insistencia de Poincaré en la importancia de las órbitas periódicas cobra ahora un nuevo sentido. No sólo la organización clásica del espacio fásico depende críticamente de las órbitas periódicas clásicas, sino que también ocurre eso con la comprensión de un espectro cuántico caótico.

Hasta ahora nos hemos limitado a hablar de sistemas cuánticos en los que un electrón está atrapado o confinado espacialmente. Pero hay efectos caóticos en sistemas atómicos en los que un electrón puede errar con libertad; y libremente se mueve desprendido de los átomos de una molécula. Aquí la energía no está ya sometida al corsé cuántico (no está "cuantizada") y la del electrón puede tomar cualquier valor, si bien la eficacia de la dispersión depende de la energía.

El caos aparece en las dispersiones cuánticas en forma de variaciones de la cantidad de tiempo durante el cual el electrón se halla transitoriamente atrapado en el interior de la molécula a lo largo del proceso de dispersión. Por mor de simplicidad, el problema puede analizarse en dos dimensiones. Al electrón, la molécula que conste de cuatro átomos le parece un laberinto. Cuando el electrón se aproxima a un átomo, tiene dos posibilidades: torcer a la izquierda o a la derecha. Cada posible trayectoria del electrón por la molécula equivaldría a una serie de giros a izquierda y derecha en torno a los átomos, hasta que la partícula termina por emerger. Todas las trayectorias son inestables: bastará un cambio insignificante de la energía o la dirección de





7. TRAYECTORIA DE UN ELECTRON a través de una molécula durante un episodio de dispersión. Esa trayectoria equivale a una serie de giros a la izquierda y a la derecha en torno a los átomos que forman la molécula (*izquierda*). La variación caótica (*arriba*) caracteriza el tiempo que tarda un electrón dispersado, de cantidad de movimiento conocida, en alcanzar una estación de control fija. El tiempo de llegada varía en función de la cantidad de movimiento del electrón. La variación es suave cuando los cambios de cantidad de movimiento son pequeños, pero presenta una estructura caótica compleja cuando los cambios son grandes. La magnitud que se representa en el eje vertical, el defase, es una medida del retraso temporal.

aproximación inicial para provocar un cambio importante en la dirección en que el electrón abandone la molécula.

En el proceso de dispersión, surge el caos del drástico aumento que se experimenta en el número de posibles trayectorias al crecer la longitud del camino. Sólo la interpretación mecánico-cuántica llega a resultados razonables; los cálculos de estricto corte clásico aportan resultados carentes de sentido. En mecánica cuántica, se usa cada trayectoria clásica del electrón para definir una pequeña onda que traza su camino por la molécula. El resultado mecánico-cuántico se obtiene de la suma aritmética de esas onditas.

Realicé hace poco el cálculo del proceso de dispersión del caso en el que la suma de las onditas era exacta. Un electrón de cantidad de movimiento conocido choca contra una molécula y sale despedido con la misma cantidad de movimiento. El tiempo que tarda el electrón en llegar a una estación de control fija varía en función de la cantidad de movimiento; la forma en que este parámetro varía envuelve de fascinación el problema. El tiempo de llegada fluctúa suavemente con pequeños cambios de la cantidad de movimiento, en tanto que, si son grandes, deja una huella caótica que nunca se ajusta a ninguna estructura sencilla.

Un aspecto particularmente intrigante del proceso de dispersión caótica es el de su posible labor de puente entre los misterios del caos cuántico y los misterios de la teoría de números. El cálculo del retraso temporal nos lleva por derecho al enigma por antonomasia de la matemática, la función zeta de Riemann. Fue ya empleada por Leonhard Euler a mitad del siglo XVIII para demostrar la existencia de un número infinito de números primos. Aproximadamente un siglo más tarde, Bernhard Riemann, uno de los fundadores de la matemática moderna, empleó la función para profundizar en la distribución de los primos. En su único trabajo sobre el tema designó la función con la letra griega zeta.

La zeta es una función de dos variables, x e y (que existen en el plano complejo). Para entender la distribución de los números primos, Riemann necesitaba conocer cuándo la función zeta valía cero. Sin aportar ninguna justificación válida, postuló que sólo es cero cuando x se hace igual a 1/2. En cálculos extensísimos se ha demostrado que tenía razón sin excepción para los primeros mil millones de ceros, pero ningún matemático ha rozado siquiera un apunte de demostración. Si la conjetura de Riemann es correcta, se podría demostrar toda clase de propiedades interesantes de los números primos.

Los valores de y para los que la función zeta es cero forman un conjunto de números que se parecen mucho al espectro energético de un átomo. Así como podemos estudiar la distribución de los niveles energéticos en el espectro, podemos abordar también la distribución de ceros de la función zeta; en este segundo caso, los números primos desempeñan el papel que ejercen las órbitas clásicas cerradas del átomo de hidrógeno en un campo magnético: los primos indican algunas de las correlaciones ocultas entre los ceros de la función zeta.

En el problema de la dispersión, los ceros de la función zeta aportan los valores de la cantidad de movimiento en cuyo dominio cambia notablemente el retraso temporal. El caos de la función zeta de Riemann se deja especialmente sentir en un teorema que no se ha demostrado hasta hace poco: la función zeta ajusta localmente cualquier función suave. El teorema sugiere que la función podría describir todo el comportamiento caótico del que es capaz un sistema cuántico. Si las matemáticas de la mecánica cuántica se prestaran a un manejo más habilidoso, descubriríamos muchos ejemplos de fenómenos localmente suaves y globalmente caóticos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

DYNAMICAL CHAOS. Dirigido por M. V. Berry, I. C. Percival y N. O. Weiss en *Proceedings of the Royal Society of London*, vol. A413, n.º 1844, págs. 1-199; 8 de septiembre de 1987.

THE HYDROGEN ATOM IN A UNIFORM MAGNETIC FIELD: AN EXAMPLE OF CHAOS. Harold Friedrich y Dieter Wintgen en *Physics Reports*, vol. 183, n.º 2, págs. 37-79; noviembre de 1989.

CHAOS IN CLASSICAL AND QUANTUM MECHANICS. Martin C. Gutzwiller. Springer Verlag, 1990.

CELESTIAL MECHANICS ON A MICROSCOPIC SCALE. T. Uzer, David Farrelly, John A. Milligen, Paul E. Raines y Joel P. Skelton en *Science*, vol. 253, págs. 42-48; 5 de julio de 1991.

CHAOS AND QUANTUM PHYSICS. Dirigido por A. Voros, M. J. Giannoni y J. Zinn-Justin. Elsevier Science Publishers (en prensa).

Absorción celular de la glucosa

La glucosa, un nutriente esencial, sólo puede entrar en las células con la ayuda de cierta proteína transportadora. ¿Cuáles son la estructura y la función de ese transportador? ¿De qué modo lo regula la insulina?

Gustav E. Lienhard, Jan W. Slot, David E. James y Mike M. Mueckler

La glucosa es la divisa oficial del metabolismo. Absorbida en el intestino y producida por el hígado, este azúcar viaja, vehiculada por la sangre, a todos los tejidos del organismo, que la emplean como recurso energético y precursor primordial de otros compuestos que contienen carbono. Un acceso a las células que, sin embargo, resulta ser bastante alambicado. Ha de transportarla al interior una proteína específica que se halla anclada en la membrana de la célula. Durante los últimos diez años, varios laboratorios, el nuestro incluido, han venido desentrañando la estructura de esa proteína y su curiosa manera de proceder. Se han descubierto ya cinco formas moleculares del transportador, cada una de las cuales está adaptada a las necesidades metabólicas del tejido donde reside.

Los acontecimientos mediados por estas moléculas vitales comienzan tras la ingestión de carbohidratos. El intestino degrada esos hidratos de carbono en glucosa, que pasa al torrente sanguíneo. Esa subida de glucosa en sangre estimula las células beta del páncreas para que liberen insulina, hormona que limpia de glucosa la sangre por doble vía: impide la liberación hepática de glucosa y activa la captación del azúcar por el músculo y el tejido adiposo. Las células musculares convierten la glucosa en glucógeno, un carbohidrato polimerizado, de rápida reconversión en glucosa. Los adipocitos convierten la glucosa en gotas de grasa para un almacenamiento duradero. Cuando bajan los niveles de glucosa en sangre, las células beta suspenden la secreción de insulina, y el metabolismo torna al estado basal.

El exceso de insulina provoca la caída de glucosa en sangre y se produce hipoglucemia, situación que puede tener un desenlace fatal al causar la inanición del cerebro y de los órganos que viven principalmente de glucosa. En la condición antagónica de escasez de insulina —o de resistencia a su efecto por parte de células musculares y adipocitos—, la glucosa en sangre se eleva y se produce hiperglucemia. La alta concentración de glucosa crea un desequilibrio osmótico, que obliga a la sangre a extraer agua de los tejidos, y los riñones la excretan en la orina junto con un exceso de sales. La deshidratación y la pérdida de sales por culpa de una hiperglucemia grave pueden conducir al coma y a la muerte. Una hiperglucemia menos grave contribuye, probablemente, a ciertas complicaciones a largo plazo que sufre el paciente de diabetes mellitus: cardiopatías, parálisis cerebral, ceguera, pérdida de la capacidad funcional del riñón y gangrena en las extremidades.

La ausencia de insulina causa la diabetes mellitus insulino-dependiente (DMID), o diabetes tipo I, que suele desarrollarse en niños o adolescentes cuando una reacción autoinmune destruye las células beta del páncreas (véase "Origen de la diabetes" por Mark A. Atkinson y Noel K. Maclaren; INVESTIGACION Y CIENCIA, septiembre de 1990). La diabetes no-insulino-dependiente (DMNID), o tipo II, aparece por lo común en la madurez y es con mucho la forma más frecuente; por dar una cifra, afecta a un 5% de la población de Estados Unidos de más de 40 años. En los primeros estadios de la DMNID algunos pacientes no carecen de insulina, observación que permite atribuir el origen de la enfermedad a un insuficiente efecto hormonal en miocitos, adipocitos y hepatocitos.

La absorción de la glucosa reviste mayor complejidad de lo que podría sospecharse. La célula, para sobrevivir, debe evitar que su interior se mezcle con el medio acuoso externo. De ese aislamiento se ocupa la membrana citoplasmática, doble capa de moléculas lipídicas que repelen el agua y las sustancias que, como la glucosa, se disuelven fácilmente en ella. (Se dice que los lípidos son hidrofóbicos, mientras que la glucosa es hidrofílica.) En virtud de esa configuración, las células no pueden absorber glucosa por difusión simple. Necesitan, por contra, recurrir a una proteína especial: a un transportador.

El primer transportador de glucosa fue aislado, en 1977, a partir de eritrocitos humanos (glóbulos rojos) por Michihiro Kasahara y Peter C. Hinkle, de la Universidad de Cornell. Ocho años más tarde en un proyecto de colaboración, dirigido por uno de nosotros (Mueckler) y por Harvey F. Lodish, del Instituto Whitehead para la investigación biomédica, se dilucidó la secuencia de aminoácidos del transportador. Siguieron un proceso retrógrado, "hacia atrás", que era en este caso la estrategia más fácil: aislaron el ADN que codifica la proteína y determinaron su secuencia de nucleótidos. Entonces aplicaron el código genético para traducir la secuencia nucleotídica en secuencia aminoacídica.

La proteína descrita por este método consiste en una cadena de 492 aminoácidos, organizada en 25 segmentos. Trece de ellos, extensamente hidrofíli-

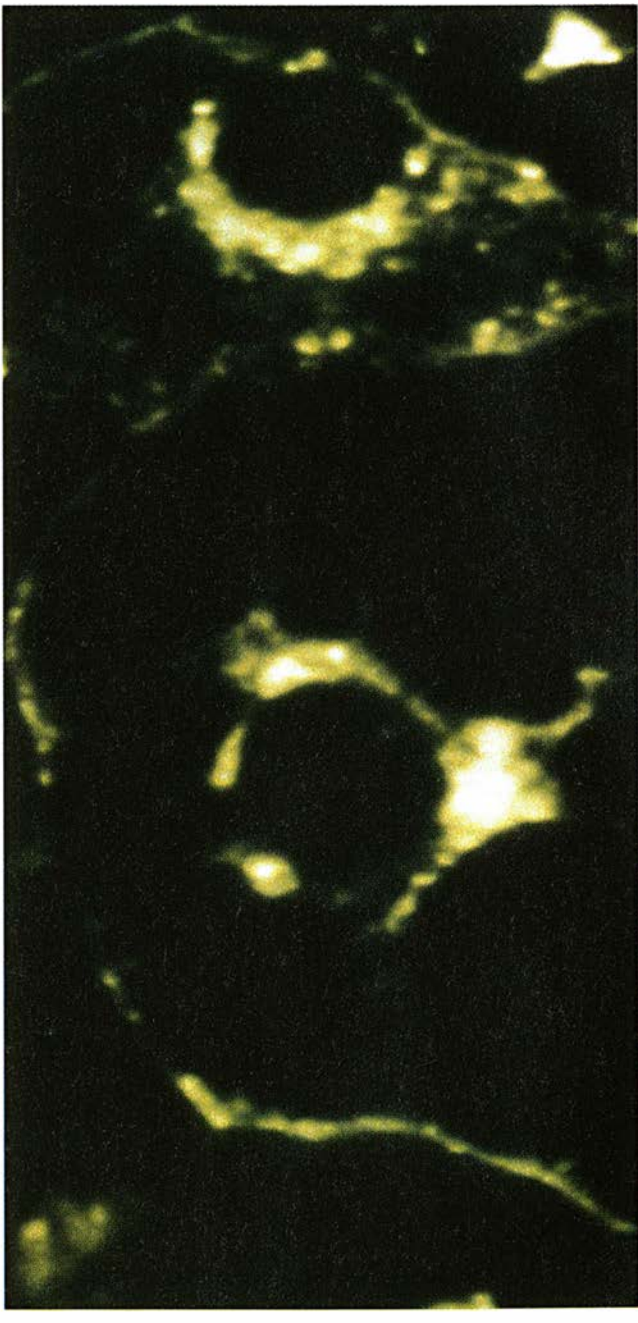
GUSTAV E. LIENHARD, JAN W. SLOT, DAVID E. JAMES y MIKE M. MUECKLER comparten un mismo interés común en la regulación del transporte de la glucosa, que les ha llevado a trabajar juntos en diversos proyectos. Lienhard viene enseñando bioquímica en la facultad de medicina de la Universidad de Dartmouth desde 1975. Investiga las formas por las cuales el receptor de insulina regula distintos procesos celulares. Slot trabaja en el departamento de biología celular de la facultad de medicina de la Universidad de Utrecht. Experto en la localización celular de moléculas proteicas por microscopía electrónica, aplica esa técnica al estudio de los movimientos de las proteínas de membrana. James y Mueckler, adscritos al departamento de biología celular y fisiología de la facultad de medicina de la Universidad de Washington, clonaron el ADN complementario que determina el transportador de glucosa GluT4, uno de los protagonistas de este artículo.

cos, muestran inclinación por los medios acuosos del interior y del exterior celular; estos segmentos se alternan con otros doce fundamentalmente hidrofóbicos, que prefieren el medio lipídico de la membrana. Semejante configuración, sumada a la información química directa sobre las partes de la proteína que se orientan al interior o al exterior del eritrocito, da pie a suponer que la proteína atraviesa 12 veces la membrana de un lado a otro.

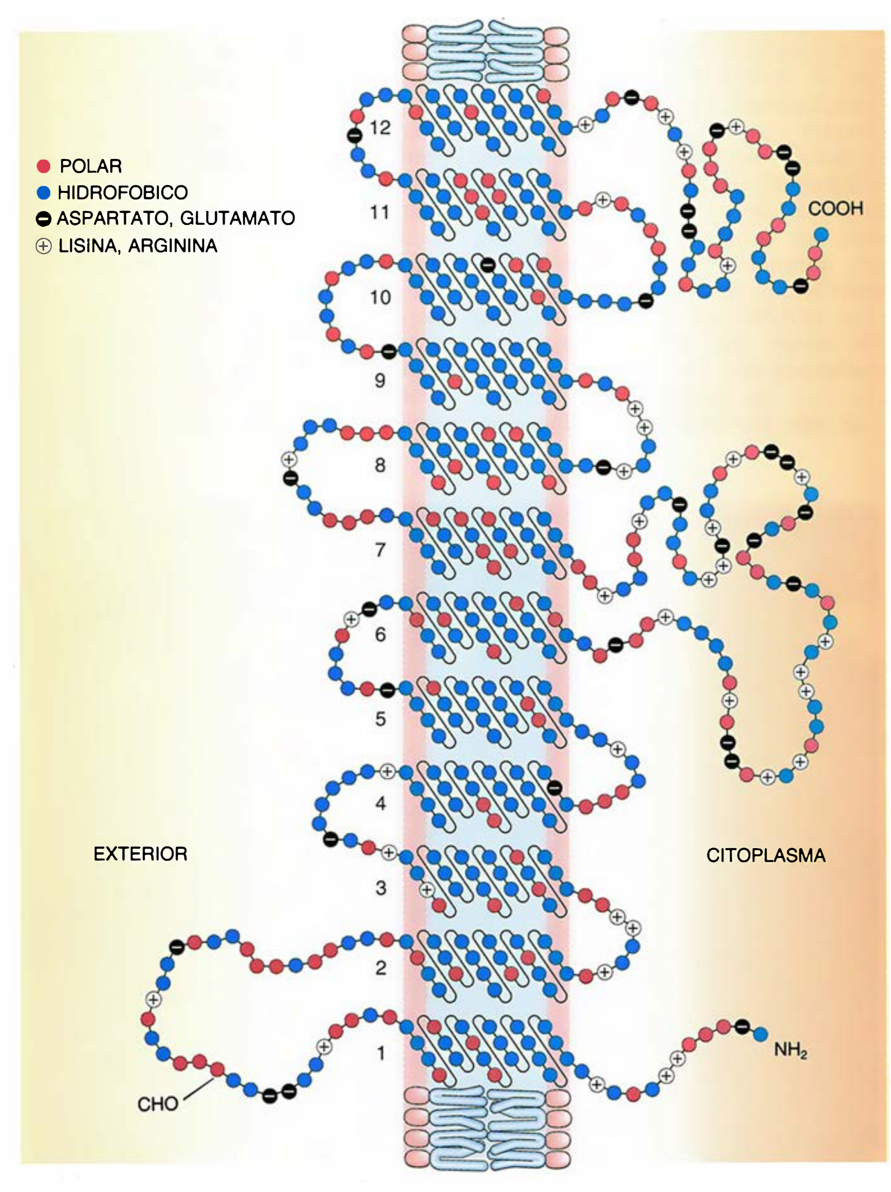
¿Cómo logra tal estructura transportar la glucosa hasta el interior celular? Forzoso es que cree un poro a través de la membrana. La arquitectura de tal poro viene sugerida por el plegamiento de la cadena polipeptídica y por el patrón de aminoácidos de los segmentos transmembrana. La espectroscopía nos descubre que cada segmento se arrolla en hélice; hasta el 80% de la cadena polipeptídica adquiere esa disposición helicoidal. En razón de la forma cilíndrica que desarrolla la hélice, los grupos químicamente reactivos de los aminoácidos desplegarán una distribución periódica en la superficie. Y de ello resulta que, en cinco segmentos transmembrana —los números 3, 5, 7, 8 y 11—, los grupos serán hidrofílicos a un lado del cilindro e hidrofóbicos en el otro. Unidos con sus caras hidrofóbicas orientadas hacia afuera —hacia los restantes segmentos transmembrana y el entorno lipídico de la membrana—, los cinco segmentos podrían formar un poro cuya superficie interna estaría presta para enlazarse con la glucosa.

Adelantemos, sin embargo, que este modelo de la estructura tridimensional del transportador de glucosa se mueve en el terreno de la hipótesis. Para determinar la estructura real, los cristalógrafos de rayos X tendrían que convertir los transportadores en cristales bien ordenados, empeño en el que han

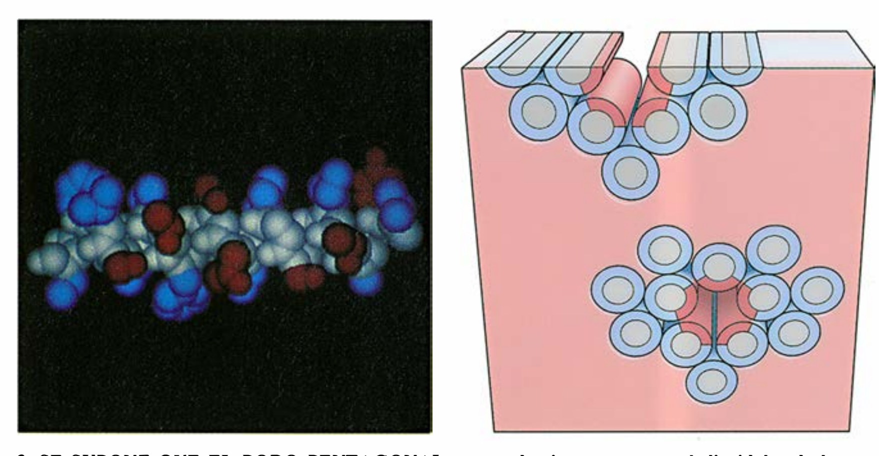




1. EL REFULGOR VERDE señala el curso de los transportadores de glucosa desde el interior de una célula de tejido adiposo hasta la superficie de ésta. Los GluT4 se marcaron con un anticuerpo unido a un compuesto fluorescente. Antes de la exposición a la insulina, forman agregados en la vecindad del núcleo celular (*izquierda*). Tras la exposición, algunos progresan hasta la superficie definida por un halo de luz (*derecha*).



2. ESTRUCTURA PROPUESTA para los 492 aminoácidos del transportador: una cadena plegada que atraviesa la membrana lipídica en doce segmentos. Los aminoácidos que tienen grupos cargados aparecen con los signos (+) o (–). Por ser esos grupos más estables en el agua que en los lípidos, la mayoría se alojan en el exterior de la membrana.



3. SE SUPONE QUE EL PORO PENTAGONAL consta de cinco segmentos helicoidales de la molécula del transportador, como el segmento número 8 ilustrado a la izquierda. Si las hélices exponen sus lados lipofílicos (*azul*) hacia la membrana y los lugares de unión de la glucosa (*rojo*) hacia el interior, forman un canal donde podría acomodarse la molécula de glucosa.

fracasado debido a la resistencia que opone la naturaleza lipofílica de estas proteínas.

En consecuencia, nuestro modelo de transportador se funda, en parte, en los ejemplos suministrados por un manojo de proteínas de membrana cristalizables y susceptibles de ser representadas (véase "Proteínas de membrana" por Nigel Unwin y Richard Henderson; INVESTIGACION Y CIENCIA, abril de 1984). Una de ellas, el centro de reacción fotosintético de bacterias, está constituida por tres cadenas de proteínas, de las que dos cruzan la membrana cinco veces y la otra una. Uno por uno, los once segmentos transmembrana poseen estructura helicoidal semejante a la que nosotros proponemos para el transportador de glucosa.

Los procesos moleculares implicados en la entrada de glucosa en la célula encierran mayor complejidad de la que da a entender nuestra descripción estructural. Se supone que el transportador modifica la glucosa al uncirse a ella mediante puentes de hidrógeno débiles y provisionales. Tales puentes tienden un átomo de hidrógeno entre un nitrógeno o un oxígeno de un compuesto y el par de electrones sin compartir de un átomo de oxígeno o de nitrógeno de otro compuesto. Los segmentos transmembrana 3, 5, 7, 8 y 11 contienen muchos aminoácidos que tienen grupos hidroxilo (OH) y carbamido ($CONH_2$) que pueden participar en la formación de puentes de hidrógeno con los numerosos grupos hidroxilo de la glucosa. La proteína transportadora se presenta, además, en dos formas: en una se engarza a la glucosa por el lado extracelular de la membrana, mientras que en la otra se une por el lado intracelular.

Abundan los datos experimentales que distinguen cuatro etapas en el ingreso de la glucosa en la célula. Comienza, en la primera, por ocupar el sitio de unión que se encuentra orientado al exterior. En la segunda etapa, el complejo formado por transportador y glucosa cambia de conformación, en virtud de la cual la glucosa está ahora en el sitio de unión encarado hacia el interior celular. En la etapa siguiente, el transportador suelta la glucosa en el citoplasma. Por último, el transportador, libre de su carga, torna a la conformación en que el sitio de unión con la glucosa mira al exterior celular. Esta cuarta etapa devuelve al transportador a su forma inicial, presto para vehicular una nueva molécula de glucosa.

Aunque desconocemos la estructura de una y otra conformación, es de presumir que en cada caso el canal esté abierto por un extremo y cerrado por el otro y que la glucosa se engarce en la cavidad del extremo abierto.

La glucosa podría avanzar entonces cuando el extremo abierto se cierre tras de ella y se abra el que, ante ella, se hallaba cerrado.

Para nosotros, pues, la proteína transportadora constituye un oscilador conformacional que traslada la cavidad de unión de la glucosa a los dos polos opuestos de la membrana. La investigación cinética, acometida por James R. Appleman y uno de nosotros (Lienhard) en la Facultad de Medicina de Darmouth, atestigua la extraordinaria rapidez con que transcurre tal oscilación. En ausencia de la glucosa, y a 20 grados Celsius, cada molécula de transportador de eritrocito se transforma de un estado a otro unas cien veces por segundo. Cuando la glucosa se une al transportador, la velocidad se acelera hasta 900 veces por segundo. La glucosa acelera la velocidad de transformación rebajando la barrera energética entre las dos conformaciones.

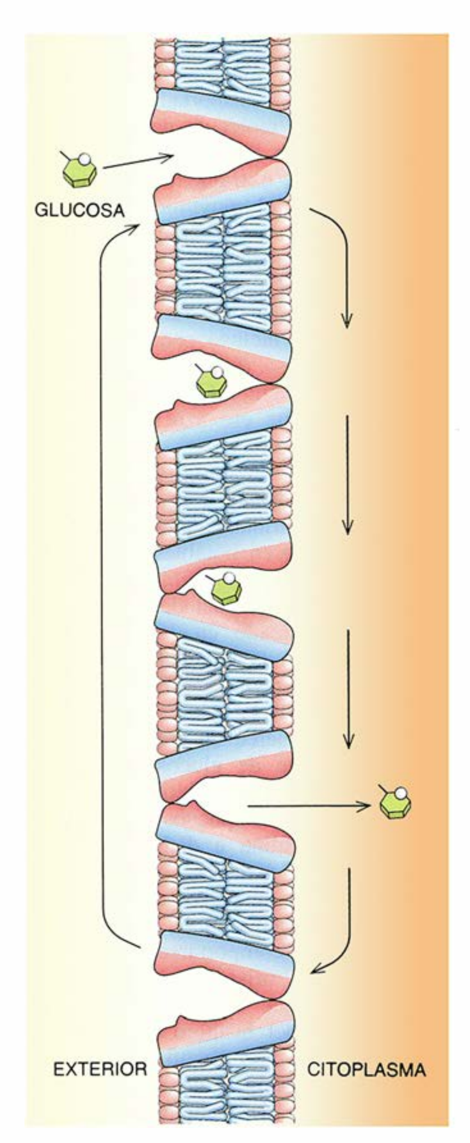
Pero, ¿por qué opera de forma tan tortuosa el transportador? A uno se le ocurren estrategias más directas: la proteína transportadora podría mantener permanentemente abierto un poro o podría haber oscilado entre esa conformación y otra en la cual el poro se hallara cerrado.

La explicación se esconde probablemente en la necesidad que posee la célula de mantenerse en desequilibrio químico con el medio extracelular. Por ejemplo, la concentración de iones sodio en el exterior celular decuplica normalmente su abundancia en el interior celular. Considerando que la molécula de glucosa adquiere un tamaño similar al de ese ion, un poro que estuviera siempre abierto dejaría paso libre para la filtración del sodio por el mismo. Obviamente, el transportador podría acarrear de vez en cuando algún ion sodio hacia el interior de la célula; pero esta filtración de iones sería insignificante: las células poseen canales transmembrana especiales por donde, cuando se abren, pasan 10 millones de iones sodio por segundo, 100.000 veces más rápido de lo que opera el transportador de glucosa.

Cada tejido necesita su cuota específica de glucosa. ¿Significa ello que precisa también de un transportador propio? Desde comienzos de los ochenta, se vienen acumulando indicios que dan respuesta afirmativa a ese interrogante. Los transportadores respondieron de forma distinta según el inhibidor químico, es decir, se mostraron más o menos eficaces en el acarreo del azúcar. Así, aunque todos vehicularon glucosa con velocidad creciente a medida que subía la concentración (desde un arranque de cero), el ritmo alcanzó su máximo; dicho de otro modo, las velocidades se saturaron a distintas concentraciones de glucosa. Pues bien, la concentración de glucosa a la cual la velocidad de transporte es la semivelocidad de saturación constituye el criterio del que se valen los expertos para clasificar los sistemas de transporte. Dicha concentración de semisaturación es alta para el transportador del hepatocito; baja, en cambio, para el transportador de las células del cerebro.

La prueba demostrativa de la diversidad de los transportadores llegó después de 1985, año en que se descubrió la secuencia del ADN que determina el transportador de glucosa del eritrocito humano; secuencia que sirvió de sonda para aislar el ADN codificador de los transportadores de otros tejidos. Han seguido ese enfoque muchos investigadores, entre otros, Graeme I. Bell, de la Universidad de Chicago, Morris J. Birnbaum, de la Facultad de Medicina de Harvard, Lodish y dos de nosotros (Mueckler y James). Hasta el momento se han descubierto un total de cinco transportadores de glucosa.

Los transportadores forman una familia cuyos miembros guardan un estrecho parecido en su estructura y función. Cada uno consta de una cadena polipeptídica de unos 500 aminoácidos. Las cinco secuencias comparten la mitad aproximada de los restos aminoacídicos, o son muy similares. Además, el modelo esbozado de plegamiento para cada transportador está integrado por 12 segmentos que abarcan de un lado a otro de la membrana.



4. ASI ENTRA LA GLUCOSA en la célula, uniéndose a un transportador cuya conformación se orienta hacia el exterior. El transportador cambia en seguida de conformación, cerrando el poro por el lado externo y abriéndolo hacia el citoplasma. Entonces la glucosa se disocia.

Cada transportador de glucosa (GluT) se numera en el orden de su descubrimiento. El primero, GluT1, abunda en las células endoteliales que tapizan los vasos sanguíneos y forman la barrera hematoencefálica. Se halla especializado, así parece, en suministrar el flujo uniforme de glucosa que necesita el cerebro. En cuantía menor se ha descubierto GluT1 en otros tejidos, señal de que acarrea la glucosa que necesitan cuando sus células se encuentran en un estado relativamente inactivo.

GluT2 aparece en las células beta del páncreas, que secretan insulina, y en los órganos que liberan glucosa al torrente sanguíneo, como el intestino, el hígado y el riñón. Las altas concentraciones de glucosa requeridas para alcanzar la semisaturación de GluT2 revelan que éste transporta glucosa en proporción a la concentración del azúcar en la sangre. Por consiguiente, GluT2 transmite puntualmente, al hígado o a las células beta del páncreas, las variaciones en los niveles de glucosa sanguínea producidas durante las comidas o durante el ejercicio.

GluT3 opera en las neuronas del cerebro. Su afinidad por la glucosa es mayor que la de GluT1, asegurándose de ese modo la aportación constante de azúcar a dichas células. Y, así, un transportador coopera con otro, para que no le falte a las neuronas el suministro de nutriente tan vital.

GluT4 es el transportador principal de las células del músculo y del tejido adiposo; absorben éstas glucosa en abundancia y la convierten en otros compuestos ricos en energía. Caracteriza a este transportador su extraordinaria capacidad para desplazarse desde el interior celular hasta la superficie externa.

GluT5 reside sobre todo en el intestino delgado. Queda mucho por descubrir en torno a su funcionamiento.

Los cinco GluT trasladan la glucosa, a través de la membrana, siguiendo el gradiente de concentración, esto es, desde la concentración mayor de glucosa hacia la menor. Es una familia

que difiere del co-transportador, encargado de extraer glucosa en contra de gradiente. El co-transportador acopla el acarreo de una molécula de glucosa al transporte de un ion sodio. La energía necesaria para extraer la glucosa se obtiene gracias al movimiento del sodio a favor de su gradiente de concentración. Este mecanismo de co-transporte hace posible que las células que recubren el lumen del intestino y del riñón absorban incluso pequeñas cantidades de glucosa de la comida y orina, respectivamente. GluT2 interviene entonces y vierte ese azúcar en el torrente sanguíneo.

Los transportadores divergen también en su respuesta a la insulina. Se trata de peculiaridades presumibles en tejidos que ofrecen notables diferencias en sus necesidades metabólicas. La respuesta más pronunciada la muestra GluT4, identificado en 1988 por James, entoces en la facultad de medicina de la Universidad de Boston, y su colaborador Paul F. Pilch.

La insulina ejerce un efecto drástico en el transporte de glucosa. Nosotros solemos trabajar con cultivos de adipocitos de ratón, adipocitos 3T3-L1. La adición de insulina a dichos cultivos, mantenidos a 37 grados C, multiplica por 15 la absorción de glucosa. El pico de absorción se alcanza en 10 minutos.

El modo de comportarse la insulina constituyó un misterio hasta 1980, cuando Lawrence Wardzala y Samuel W. Cushman, del Instituto Nacional de la Salud, y Kazuo Suzuki y Tetsuro Kono, de la facultad de medicina de la Universidad de Vanderbilt, descubrieron, simultánea e independientemente, el fenómeno del reclutamiento de los transportadores. Observaron que las células poseían una reserva de transportadores de glucosa (se trataba, lo sabemos ahora, de GluT4) y trasladaban algunos hasta la membrana en respuesta a la insulina. Luego, cuando mengua la glucosa en sangre y con ello la secreción de insulina, se invierte el proceso de reclutamiento.

Podemos seguir ese reclutamiento auxiliados por técnicas microscópicas. En cierta de ellas, se marcó el GluT4 de adipocitos 3T3-L1 con anticuerpos que emitían fluorescencia en la longitud de onda del verde al exponerlos a luz azul. Las células que no fueron estimuladas con insulina mostraron muchos puntos en el interior de la célula que emitían luz verde, y casi ninguno en la superficie celular. Pero después del tratamiento con insulina, la superficie de la célula brilló de color verde: tuvo que producirse un traslado masivo de moléculas de GluT4 desde el interior hacia la superficie celular.

Estos resultados se confirmaron y cuantificaron en un estudio que empleó un marcador diferente. En finos cortes de tejido, se engarzaron anticuerpos específicamente en GluT4. Se trataron luego los cortes con diminutas partículas de oro unidas a proteínas que se pegan a los anticuerpos, marcando específicamente el GluT4. Las partículas pueden percibirse sin dificultad en el microscopio electrónico. Slot, uno de los autores del artículo, se sirvió de esa técnica para localizar y contar moléculas de GluT4 en células sensibles a la insulina. Antes de la estimulación por la hormona, sólo había en la superficie celular un 1% de las moléculas de GluT4 marcadas; después de la estimulación, la proporción se elevó al 40%.

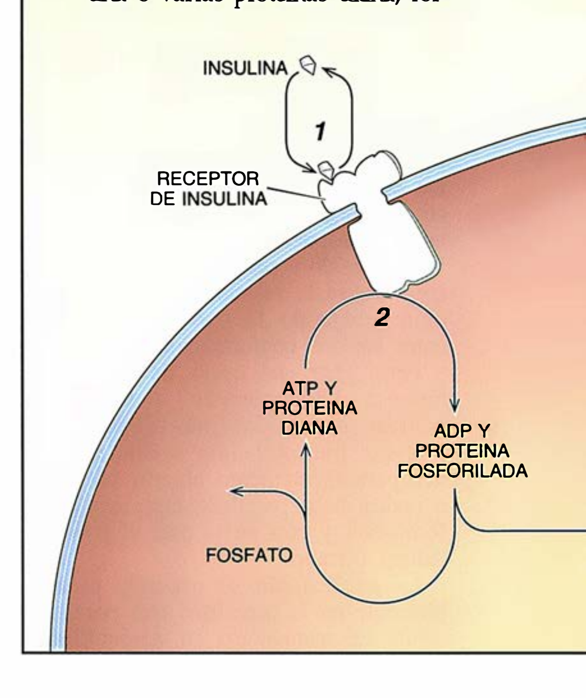
¿De qué se vale la célula para trasladar GluT4 hasta la membrana y recuperarlo de allí, en respuesta a la insulina? No puede darse todavía una contestación cabal, aunque trabajan en ello muchos expertos. Ya que el transportador de glucosa es una proteína que se encuentra anclada en la membrana, por la cara interna y por la externa, podemos inferir que migrará integrada en una vesícula de membrana. Probablemente, la insulina insta a las vesículas intracelulares que contienen GluT4 para que se trasladen hasta la superficie interna de la membrana celular y se fundan con ella.

El proceso de regreso manifiesta mayor complejidad. En una secuencia de sucesos, cuyos pormenores ignoramos, las microvesículas que contienen GluT4 se separan, por estrangulación, de la cara interna de la membrana y se funden con los endosomas, unos sacos membranosos mayores. Dentro ya de los endosomas, las moléculas de GluT4 se segregan en prolongaciones tubulares, prominencias que acabarán por constituir nuevas vesículas. Esta transferencia de GluT4 hasta el interior celular se realiza en cualquier momento; ahora bien, en presencia de insulina, las vesículas se refunden de inmediato con la superficie celular. La retirada de la insulina rompe el ciclo y provoca la acumulación de las vesículas.

Por ser GluT4 el principal isotipo que se traslada, y pasar del interior celular a la superficie (y viceversa, según el nivel de insulina), nos entró la sospecha de que poseyera un mecanismo de guía, ausente en cualquier otro isotipo. La clave característica de este mecanismo podría hallarse en el emplazamiento de GluT4 en vesículas intracelulares si no hay insulina; los GluT de otros tejidos acostumbran residir en la superficie celular, esté o no presente la insulina.

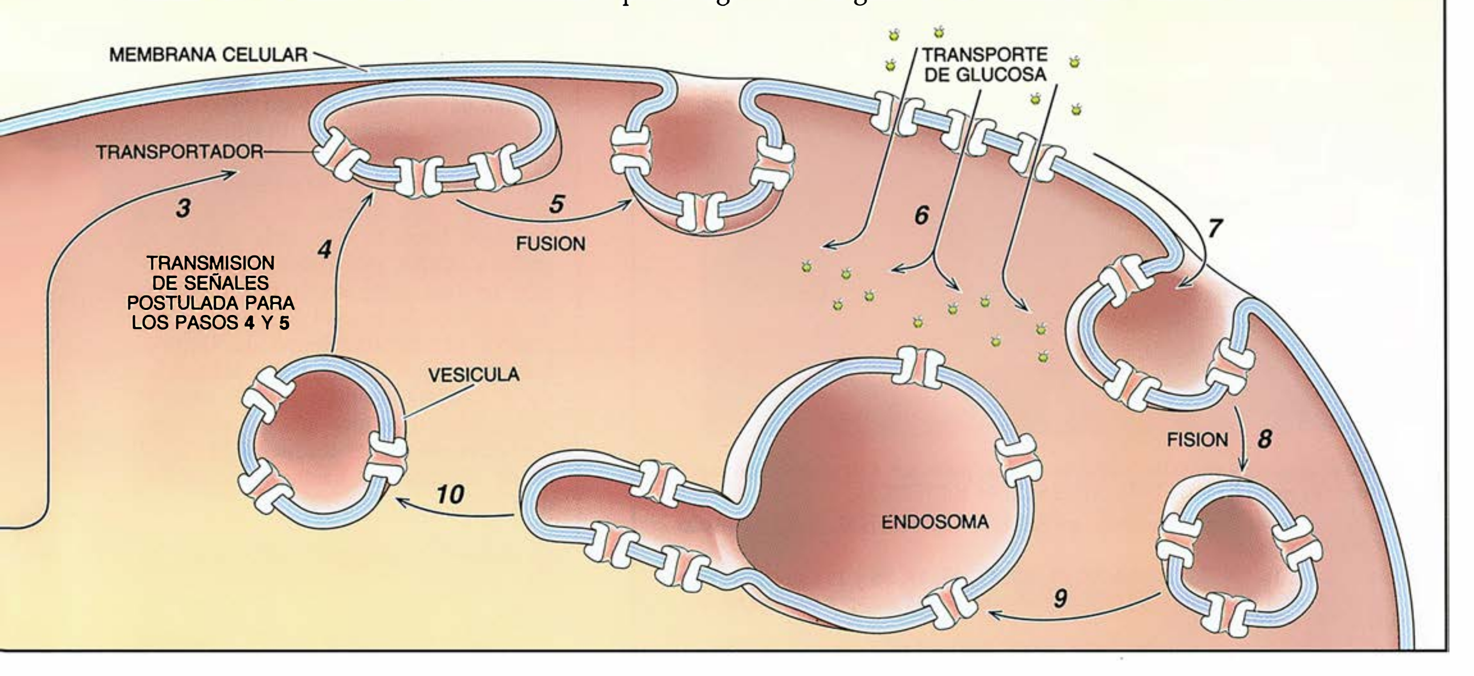
El mecanismo en cuestión debe depender de un único segmento de aminoácidos de GluT4, capaz, verosímilmente, de dirigir al transportador hasta las vesículas mediante su interacción con otras proteínas. Este segmento desempeñaría, pues, la función de dirección y sello de una carta. La validez de tal hipótesis se pretende dilucidar a través de técnicas de biología molecular que permitan producir formas mutantes de GluT4 susceptibles de expresarse en las células. Si se descubriera que la forma mutante reside en la superficie de una célula en su estado basal, resultaría que el lugar donde ocurrió la mutación vendría a coincidir probablemente con esa marca de identificación.

Cuando la insulina se une a la célula, desencadena una serie de procesos moleculares que acaban por redistribuir los transportadores de glucosa en la membrana celular. Conocemos sólo el comienzo y el final de esa cascada de acontecimientos. Se inicia con la unión de la insulina de la sangre a proteínas específicas que se encuentran ancladas en la membrana celular. La proteína emerge de ambos costados de la membrana. Cuando la insulina se une al saliente de la parte externa, el receptor se reestructura de nuevo, para permitir que la proyección interior fosforile el aminoácido tirosina de regiones específicas dentro de proteínas diana espe-



Papel de la insulina en el reclutamiento celular de transportadores

mándose ADP (*2*). De acuerdo con una hipótesis aceptada, una proteína diana fosforilada indica la redistribución de los transportadores de glucosa (*3*) mediante el movimiento hacia la membrana de vesículas que contienen a los transportadores (*4*). Las vesículas se funden con la membrana (*5*) para acelerar el transporte de glucosa (*6*). Los transportadores penetran en el interior celular tras la formación de microvesículas por invaginación (*7*) y fisión (*8*) de la membrana y la fusión de esos orgánulos con endosomas mayores (*9*); en éstos, el transportador crea extensiones tubulares que se estrangulan formando nuevas vesículas (*10*). Mientras que la insulina permanece, las vesículas continuarán fundiéndose con la membrana, pero una caída en los niveles de insulina rompe el ciclo, y los transportadores de glucosa se acumulan en vesículas intracelulares.



cíficas. No se sabe de ninguna proteína diana que esté implicada en el reclutamiento de transportadores de glucosa, habiéndose descartado el candidato obvio: el propio transportador de glucosa.

Para desentrañar la cadena de acontecimientos iniciados por el receptor de insulina, han aparecido dos enfoques. De acuerdo con el primero, importa descubrir la proteína diana por aislamiento y caracterización de proteínas dotadas de tirosinas que se fosforilan en respuesta a la hormona. El enfoque complementario atiende a las proteínas que se encuentran en las vesículas de almacenamiento de GluT4. La insulina podría cambiar una de estas proteínas para que acelere el curso de la vesícula hacia la superficie celular o para que induzca su fusión con tal superficie. La vesícula podría vehicular también otras proteínas para promover funciones que ignoramos. Esas posibilidades nos vienen sugeridas por el propio mecanismo vesicular. Por tortuoso camino que nos parezca para regular la velocidad de transporte de glucosa a la célula, resultaría eficaz en el traslado de proteínas de un lado a otro de la superficie celular.

Estos hallazgos no conciernen a la causa de la diabetes mellitus dependiente de insulina; sí importan a la segunda forma: DMNID. La predisposición a adquirir la DMNID es genética; habrá, pues, un gen al menos que predisponga a sus portadores a contraer la enfermedad. Cabe, así, la posibilidad de que un gen defectivo deteriore la capacidad de movimiento de GluT4 en respuesta a la insulina.

Una de las primeras manifestaciones de la DMNID es la resistencia a la hormona: incapacidad del músculo, tejido adiposo o hígado de responder eficientemente ante elevados niveles de insulina en sangre. El páncreas replica a esa oposición con una sobreproducción de insulina, motivo por el cual algunos pacientes muestran, en los primeros estadios de la DMNID, lo mismo una hiperglucemia transitoria después de una comida rica en carbohidratos que unos niveles firmemente elevados de insulina en sangre. Con el avance de la enfermedad, el páncreas suele perder la capacidad de segregar suficiente insulina como para compensar la resistencia insulínica. Cuando esto ocurre, la hiperglucemia persiste entre las comidas, y el paciente puede requerir la administración de insulina o de otras drogas para bajar los niveles de glucosa en sangre.

Esa recreación de la realidad se apoya en los resultados recientes de Lodish y Bernard Thorens, del Instituto Whitehead, y Roger H. Unger, de la facultad de medicina de la Universidad del Suroeste de Texas. Estudiando dos modelos animales de DMNID diferentes, hallaron que las células beta del páncreas tenían una cantidad reducida de GluT2, su isotipo. Esta reducción guardaba correlación con la menguada secreción de insulina en respuesta a elevados niveles de glucosa. Si recordamos que el transporte de más glucosa a las células beta normalmente dispara la liberación de insulina, la reducción de GluT2 podría constituir la causa de una inadecuada secreción de insulina.

La clave de la resistencia a la insulina podría esconderse en el músculo esquelético, que da cuenta del 80% de la glucosa consumida por el cuerpo en el período posterior a la ingestión de una comida rica en carbohidratos. (En otras situaciones, cuando el metabolismo se encuentra en estado basal, el cerebro consume el 60% del azúcar.) Las células musculares convierten el exceso de glucosa en glucógeno a una velocidad que se encuentra limitada por el transporte de glucosa. Debido a que los pacientes con DMNID acumulan glucógeno muscular a una veloci-

dad que ronda la mitad de la normal, probablemente tengan un defecto en al menos una de las proteínas que regulan el transporte de glucosa.

Hay otro aspecto que ayuda a delimitar el campo de investigación. La resistencia insulínica no puede obedecer a una carencia absoluta de GluT4 en las células musculares. Las mediciones recientes de GluT4 en biopsias de músculo de individuos normales y diabéticos manifiestan que los pacientes de DMNID poseían cantidades de esta proteína iguales o ligeramente por debajo de lo normal. Pero GluT4 podría causar resistencia insulínica por otra ruta, encaminándosele quizás hacia compartimentos intracelulares equivocados —de donde no pudiese ser reclutado hacia la superficie celular. O pudiera ocurrir que hubiera alguna lesión en otra parte de la ruta de señales a través de la cual la insulina promueve el reclutamiento de GluT4. Lesión en que podría verse involucrado el receptor insulínico de la superficie celular o alguna de las proteínas desconocidas que traducen la señal desde el receptor hasta las vesículas de GluT4.

La cuestión principal reside, pues, en averiguar si está dañado el mecanismo de reclutamiento de GluT4 en las células musculares de los pacientes diabéticos. En caso afirmativo, la dilucidación de los sucesos que comienzan en el receptor de insulina y terminan con el reclutamiento nos habrá de mostrar de qué manera el mensaje de la insulina se extravía o se equivoca de dirección.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SEQUENCE AND STRUCTURE OF A HUMAN GLUCOSE TRANSPORTER. M. Mueckler et al. en *Science*, vol. 229, págs. 941-945; 6 de septiembre de 1985.

KINETICS OF THE PURIFIED GLUCOSE TRANSPORTER: DIRECT MEASUREMENT OF THE RATES OF INTERCONVERSION OF TRANSPORTER CONFORMERS. J. R. Appleman y G. E. Lienhard en *Biochemistry*, vol. 28, n.º 20, págs. 8221-8227; 3 de octubre de 1989.

FACILITATIVE GLUCOSE TRANSPORTERS: AN EXPANDING FAMILY. G. W. Gould y G. I. Bell en *Trends in Biochemical Sciences*, vol. 15, n.º 1, págs. 18-23; enero de 1990.

FAMILY OF GLUCOSE-TRANSPORTER GENES: IMPLICATIONS FOR GLUCOSE HOMEOSTASIS AND DIABETES. M. Mueckler en *Diabetes*, vol. 39, n.º 1, págs. 6-11; enero de 1990.

IMMUNO-LOCALIZATION OF THE INSULIN REGULATABLE GLUCOSE TRANSPORTER IN BROWN ADIPOSE TISSUE OF THE RAT. J. W. Slot et al. en *Journal of Cell Biology*, vol. 113, n.º 1, págs. 123-135; abril de 1991.

Perfiles

Gary Stix

THOMAS EISNER: *el encanto escondido de los insectos*

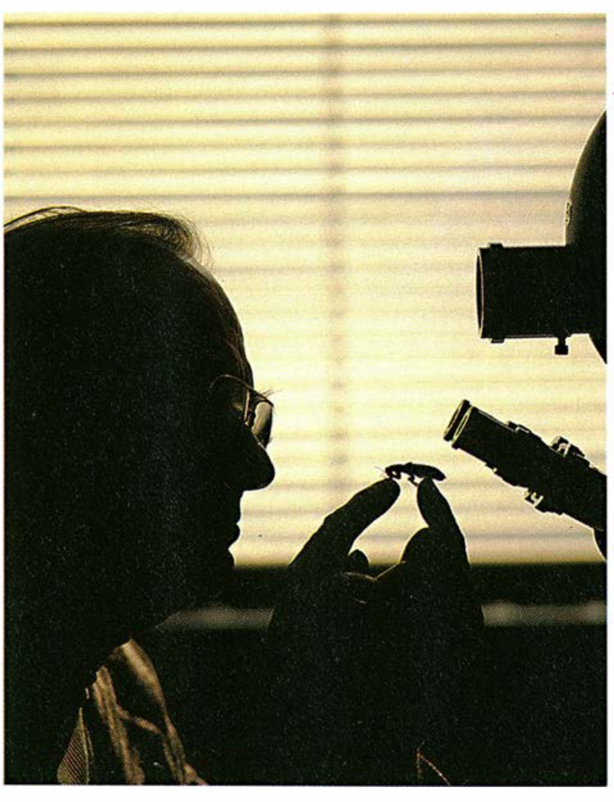
Lleva más de una hora hablando de la "prospección química". La naturaleza, asevera, es un vasto e inexplorado almacén de productos químicos de potencial eficacia terapéutica contra el cáncer, la diabetes o el catarro común. Con lo que se extraiga en ese orden de las plantas, insectos y otros organismos, habrá el hombre compensado lo invertido en la conservación de la naturaleza. Lo dice convencido Thomas Eisner, profesor de biología en la Universidad de Cornell y pionero de la química ecológica.

De cuerpo estirado, dicción rápida, dejándose las patillas largas a la moda de los años de los Beatles, este hombre de 62 años no ha regateado esfuerzos en convencer de su doctrina a políticos e industriales, a los periodistas. Pero ya empieza a mostrar síntomas de fatiga. Aprovecho un alto en su exposición para recordarle que ha prometido enseñarme algunos escarabajos bombarderos, así llamados porque se defienden con un chorro lanzado a presión.

"¡Cierto!", exclama Eisner. Sale disparado, para regresar un minuto más tarde con una caja de plástico. La deja cuidadosamente encima de la mesa, echa una mirada a sus habitantes, varias docenas de escarabajos parduscos con las antenas desplegadas. Los observa con afecto. "¿No son hermosos?"

Eisler ha logrado elevar su diversión infantil hasta convertirla en profesión rigurosa. Es autoridad mundial en insectos, especialmente en las estrategias químicas de que se valen para sobrevivir. Ilustra este fenómeno con ejemplos llamativos: el de una mariposa nocturna cuya dieta amarga la hace repugnante a las arañas y atractiva a su pareja, o el de una hembra de luciérnaga que seduce y engaña a los machos de otra especie, para devorarlos y apropiarse del veneno que repele a los depredadores. Edward O. Wilson, de la Universidad de Harvard, antiguo compañero suyo de clase y promotor de la sociobiología, le llama "el Seurat de la biología evolutiva".

Eisner ha destacado también por sus ideas conservacionistas y su solidaridad con los científicos que trabajaban en los países del socialismo totalitario. Es un melómano, que toca el piano y dirige una orquesta de aficionados en Cornell. Su divisa, paráfrasis del comentario de Mark Twain a una pieza wagneriana, reza: "No somos tan malos como lo que suena".



"Erase un hombre a una nariz pegado". Nadie ha hecho tanto como Eisner para descubrir las señales químicas de los insectos. Fotografía: Robert Prochnow.

Por encima de todo, disfruta con sus artrópodos, aunque muchas veces los imponderables se interpongan en su camino. Nació en 1929 en Berlín de padre judío y madre cristiana. Cuando los nazis llegaron al poder en 1933 la familia huyó a España, donde al poco estalló la guerra civil. Uno de los primeros recuerdos que guarda Eisner es el de encontrarse sentado en un solar de Barcelona cazando y espiando sus animalillos favoritos cuando un automóvil lleno de dinamita explotó y se empotró contra una casa cercana. Eisner recuerda que no tuvo miedo, sino que sólo se sintió irritado "por ver interrumpido mi juego con los insectos".

En 1937 la familia embarcó con destino a Sudamérica. Se establecieron en Montevideo (Uruguay), un paraíso para el naturalista en ciernes. Convirtió su alcoba en un gabinete donde convivían mariposas tropicales, escarabajos, arañas y hormigas. "Nadie se atrevía a entrar allí", se jacta. "No tenía necesidad de compañeros." Tras un momento de reflexión, añade: "Debo haber sido un bicho raro."

Desarrolló también una insólita sensibilidad y fascinación por los olores. "Soy, como el poeta, un hombre a una nariz pegado." Habilidad que heredó de su padre, químico profesional que preparaba perfumes en casa. No tardó en darse cuenta de que muchos insectos despedían un penetrante olor.

En 1947 los Eisner se mudaron a Nueva York. Poco después un Eisner adolescente pedía plaza en algunas prestigiosas universidades... en vano. (Le gusta enseñar a las visitas la carta por la que se le rechazaba su solicitud de ingresar en el centro donde enseña ahora, y desde hace muchísimos años. Apretó en su estudio del inglés (los idiomas de su infancia fueron el alemán y el español), y pudo por fin entrar en Harvard, donde se doctoró en biología en 1955.

En los años cincuenta, señala, los biólogos apenas podían atisbar la intervención de secreciones, aromas y olores en el comportamiento de los insectos. El mismo sintió realmente ese interés tras la lectura de un artículo sobre la comunicación de las abejas pioneras a sus compañeras de panal de dónde se encontraba el néctar, información que desplegaban a través de complicados pasos de baile. Recordando los extraños olores que desprendían sus artrópodos, se preguntó "qué ocurriría si mediaban sustancias químicas, en vez de las postuladas señales acústicas o visuales".

Firmado el contrato, en 1957, para enseñar biología en la Universidad de Cornell, Eisner comenzó esa línea

de investigación. No era la química su fuerte; pero formó equipo con Jerrold Meinwald, químico orgánico del mismo centro. (Meinwald toca la flauta en su orquesta de ocasión.) "Todo lo que haya conseguido yo en los últimos 30 años se debe al menos en un 50% a haber trabajado con él", dice Eisner.

Los descubrimientos del dúo solían arrancar de alguna observación, sencilla y perspicaz, de Eisner. Cierta vez, vio que una araña soltaba de su tela a un macho de polilla muy vistoso. ¿Por qué no se lo comía? Porque los machos de polilla, en su fase de oruga, se alimentan de plantas que contienen alcaloides que las arañas detestan.

Eisner y Meinwald establecieron que los alcaloides vienen a ser una suerte de colonia con que se perfuma el macho para atraer a la hembra. "Para ser aceptado en el apareamiento, debe ofrecerle en arras su cuota de toxina. Si no aporta suficiente, lo envía a hacer gárgaras. La razón es de peso: la toxina pasa del semen del macho a los huevos, protegiéndolos de los predadores."

El caso de la mujer fatal se resolvió cuando Eisner descubrió que un polluelo de tordo comía con fruición algunas especies de luciérnaga y rechazaba otras. Investigándolo, halló con Meinwald que las luciérnagas rechazadas contenían un esteroide venenoso que les faltaba a las otras.

Los investigadores descubrieron entonces que las hembras de una especie no venenosa frecuentemente atraían y consumían a los machos de una especie venenosa, imitando las conductas nupciales que adoptaban las hembras de esa especie. La impostora se protegía de esta manera a sí misma y a sus huevos. "Todo este asunto de la preocupación por la progenie es una peculiaridad maravillosa del mundo de los insectos."

Hay también en los archivos de Eisner otro caso de fraude y asesinato que concierne a los áfidos peludos. Los áfidos, dotados de un recubrimiento ceroso que recuerda la lana de oveja, segregan un néctar codiciado por las hormigas. Estas no los matan, sino que los mantienen apriscados, "ordeñando" su néctar y protegiéndolos de posibles predadores.

Mientras estaba observando uno de esos "corrales" de áfidos, Eisner se fijó en algunos que se movían con presteza. Una observación más detallada le permitió descubrir que en realidad no eran sino larvas de un mortal predador de áfidos. No tardó en advertir que las larvas se habían cubierto con una cera parecida a la lana que habían quitado a los áfidos. Disfrazadas de esta guisa, tanto a la vista como al olfato, los "lobos" devoraban a su gusto a los áfidos tras haber burlado a los perros guardianes, las hormigas.

Y está ese prodigio de ingeniería que es el escarabajo bombardero. Su primer encuentro con él ocurrió en sus años estudiantiles, cuando impulsivamente se lo metió en la boca. Apela en su descargo al ejemplo de un augusto predecesor. "No puedo estar seguro de que fuera un escarabajo bombardero, pero Darwin cuenta que se llevó un escarabajo a la boca porque necesitaba las manos libres para coger dos más." Darwin, como Eisner, sintió una irritante sensación de calor en su boca. "Se quedó tan sorprendido que perdió los dos escarabajos de sus manos. La avaricia rompe el saco." Años después, Eisner y varios colaboradores, en particular Daniel Aneshansley, hallaron que el escarabajo prepara ese chorro tóxico combinando dos reactivos químicos en una cámara de reacción en su abdomen. El intenso calor generado en la reacción pone a hervir la mezcla. No se sabe de ningún otro proceso biológico que genere temperaturas tan elevadas.

Tras recabar la ayuda de Harold Edgerton, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, el abuelo de la fotografía de alta velocidad, el grupo de Eisner determinó que el escarabajo escupe a presión el líquido hirviente en un chorro corto a través de dos boquillas orientables en la parte trasera de su cámara. El aspecto de su cámara de reacción recuerda el motor del cohete alemán V-1.

Cualquier lugar le parece bueno para dejarse sorprender por la naturaleza, lo mismo en los bosques cercanos a su casa de Ithaca (Nueva York), que la Estación Biológica Archbold, en Lake Placid, donde lleva a cabo gran parte de su investigación, o un descampado irrelevante. Saca incluso partido de su fobia a volar. "Cuando conduzco, me paro cada 100 o 200 kilómetros y busco insectos por los terraplenes."

Parejo a su aprecio por la naturaleza ha crecido en él un hondo temor ante el futuro que le aguarda. Se ha comprometido en distintas acciones conservacionistas durante su carrera. Conjuntamente con Wilson, lideró con éxito una agrupación para la creación de reservas naturales en Florida, a finales de los sesenta. A principios del decenio siguiente, consiguió doblegar la voluntad del legislador en el mismo sentido, ahora en el estado de Texas.

Pero percibe con nitidez creciente que no puede limitar su acción conservacionista al puro mantenimiento de espacios. En 1989 propuso que los países vendieran a la industria "licencias" para prospecciones químicas en sus espacios naturales. "Me siento raro hablando como un economista de mercado, pero la conservación de las tierras beneficia, en primer lugar, a los propios lugareños." Conoce como nadie el potencial comercial de los compuestos naturales. El y Meinwald han encontrado un miriápodo que almacena un potente repelente de insectos, una luciérnaga rica en digital y un escarabajo que sintetiza una sustancia química afín a un poderoso sedante. Además, en los últimos años han avanzado mucho las técnicas para sintetizar compuestos beneficiosos.

Con tan sólida argumentación, logró convencer a la empresa Merck, un gigante de la industria farmacéutica, para que invirtiera un millón de dólares en una reserva costarricense, una selva tropical, a cambio de los productos químicos que se extrajeran de la selva. Espera que otras compañías sigan el ejemplo de Merck.

Durante estos últimos meses, la promoción de prospecciones químicas le ha mantenido extraordinariamente ocupado, pero este fin de semana planea reservar un tiempo para ir a ver bichos. "Tengo un laboratorio que me hice justo al lado de casa", dice. "Los domingos me los paso allí. Hay que estar siempre con las antenas puestas, como los escarabajos."

Ciencia y sociedad

Fuerza cromodinámica

Evolución de su intensidad

Un hecho familiar de la experiencia cotidiana es la existencia de cargas eléctricas, como responsables de las fuerzas electromagnéticas, cuya magnitud constituye una medida de la intensidad de la interacción correspondiente. Menos conocido, sin embargo, e incluso sorprendente es el hecho de que una misma carga eléctrica, en interacción, aumenta su magnitud al aumentar la energía (o, equivalentemente, al disminuir la distancia) con que interacciona. Esta variación se da, asimismo, con las demás cargas responsables de las interacciones fundamentales de la naturaleza. En particular, se ha comprobado que la carga de las interacciones fuertes evoluciona con la energía y, por tanto, su intensidad también evoluciona.

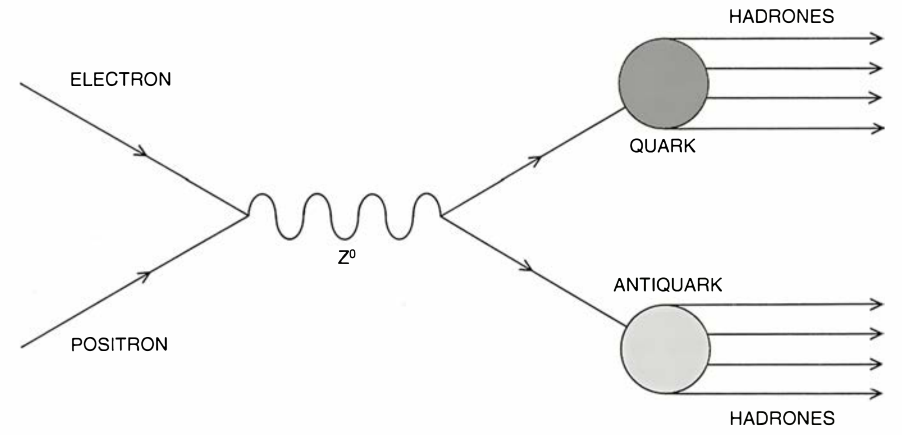
Se sabe, desde principios de siglo, que la materia está prácticamente vacía. A esta conclusión llegó Rutherford a raíz de un famoso experimento en el que se enviaban partículas α contra láminas de oro. Las partículas α atravesaban las láminas sin sufrir ningún tipo de desviación, en la inmensa mayoría de las veces; pero en alguna rara ocasión, dentro del mismo experimento, alguna partícula α se desviaba apreciablemente. De ese modo quedó al descubierto la existencia del núcleo atómico, donde se concentra prácticamente toda la materia ocupando una zona ínfima del espacio. Mientras el átomo tiene dimensiones de 1 angstrom = 10^{-8} cm, el núcleo las tiene de 1 fm = 10^{-13} cm, es decir, el volumen del núcleo es 15 órdenes de magnitud menor (una milbillonésima parte) que el volumen atómico. El núcleo de los átomos está formado por protones y neutrones, a partir de los cuales se han podido producir en los laboratorios de física cientos de otras partículas. La mayoría de ellas son de vida media muy corta; su estudio ha permitido conocer las fuerzas fundamentales de la naturaleza.

En la década de los sesenta se observaron regularidades en el comportamiento de las partículas (hadrones) que interaccionan fuertemente, es decir, con la misma fuerza que empaqueta los protones y neutrones en el núcleo atómico. Gell-Mann y Zweig (1964) sugirieron que tales regularidades se podían explicar suponiendo que estas partículas estaban formadas por constituyentes más elementales, a los que se llamó quarks. Junto con los leptones (electrón, muon, tauón y sus neutrinos), los quarks se agrupan en familias y se suponen los últimos constituyentes de la materia. La formación y propiedades de ésta se pueden o deben explicar a partir de las interacciones fundamentales entre dichos constituyentes. Estas fuerzas son la interacción fuerte entre quarks y la interacción electrodébil entre todas las partículas elementales. De hecho, la fuerza nuclear es un remanente de la interacción fuerte entre quarks.

Desde los primeros años de la década de los setenta, experimentos del tipo de Rutherford han permitido "cazar" los quarks constituyentes de los hadrones. Para ello se provoca el choque de electrones contra protones a energías elevadas, que permitan a los electrones penetrar en las zonas más profundas del protón. Los resultados de tales experimentos ponen de manifiesto la existencia de quarks dentro del protón, en cuyo interior aquéllos se comportan como libres de interacción fuerte. Pero no se han hallado quarks libres aislados, es decir, fuera del entorno hadrónico. La explicación de estos fenómenos se mueve en el terreno de la descripción cualitativa, partiendo de la teoría de la cromodinámica cuántica, que sienta los principios básicos de la interacción fuerte.

La cromodinámica cuántica, formulada a lo largo de los años 70, explica que la intensidad de la interacción fuerte, medida en términos de lo que se llama "constante" de acoplamiento fuerte, evoluciona de la forma siguiente. A cortas distancias, comparadas con el tamaño del hadrón, la constante de acoplamiento entre quarks es pequeña y decrece al disminuir la separación entre ellos (lo contrario de lo que sucede con las interacciones electromagnéticas), propiedad ésta que se conoce por libertad asintótica. Ahora bien, al aumentar la distancia entre los quarks crece la intensidad de la interacción hasta que llega un momento en que impide que los quaks se liberen como partículas aisladas; fenómeno o propiedad que recibe el nombre de confinamiento.

No se disponía de una prueba sólida que confirmara experimentalmente la evolución de la constante de acoplamiento fuerte. Recientemente, sin embargo, el colisionador LEP, del CERN, ha producido hadrones mediante colisiones electrón-positrón (la antipartícula del electrón) a energías altísimas, cercanas a los 100 gigaelectronvolts, correspondientes a la creación del bosón mediador Z. El origen de la formación de hadrones en este colisionador es la creación de una pareja quark-antiquark a muy pequeñas distancias, del orden de una milésima de fm; interacionan, pues, fuertemente con una constante de acoplamiento pequeña. Constante que se ha medido en los cuatro detectores de que consta el LEP: ALEPH, DELPHI, L3 y OPAL, con el resultado $\alpha_s(M_z)$ = 0,120 ± 0,007. Su valor se puede comparar con el correspondiente a la formación de hadrones a energías menos elevadas, por ejemplo, en la desintegración del leptón pesado tau. En este caso las

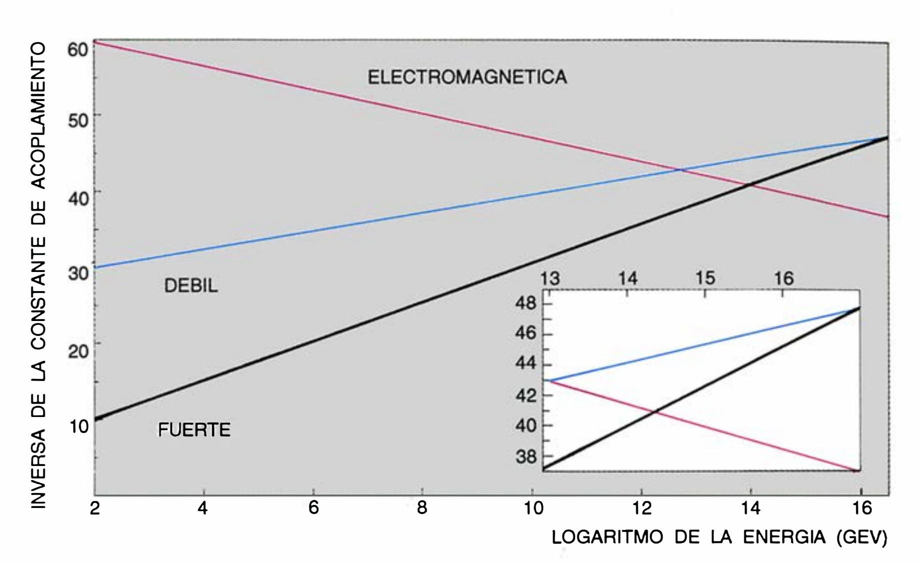


UNA PAREJA ELECTRON-POSITRON se aniquila originando un bosón Z, que se desintegra en una pareja quark-antiquark. Debido a las interacciones fuertes, la pareja quark-antiquark se transforma en hadrones.

distancias mutuas entre quarks exploradas son del orden de una décima de fm y la constante de acoplamiento fuerte resulta ser mayor, con un valor $\alpha_S(M_\tau) = 0,34 \pm 0,004$. Si este resultado experimental se deja evolucionar teóricamente hasta la energía de Mz, se predice el resultado $\alpha_s\ (M_z) = 0,120 \pm 0,005$, que coincide espectacularmente con el valor obtenido en los experimentos de LEP. Se comprueba así la evolución de la constante de acoplamiento, de acuerdo con las predicciones de la cromodinámica cuántica.

Una vez establecida la evolución de la constante de acoplamiento con la distancia (o, inversamente, con la energía) se plantea otra cuestión de interés; nos referimos a la formulación de torías de gran unificación (GUT), siguiendo el esquema conceptual de Georgi y Glashow de mediados de los años setenta. La teoría estándar consta de la interacción fuerte, descrita por la cromodinámica cuántica, y de la interacción electrodébil, que corresponde a la formulación unificada de las fuerzas electromagnética y débil. En cuanto a la evolución de las constantes de acoplamiento fuerte y débil de la teoría estándar, éstas se hacen cada vez más pequeñas al disminuir la distancia entre los constituyentes que interaccionan, mientras que la constante de acoplamiento electromagnética aumenta al acortarse dicha distancia. Las tres constantes de acoplamiento se determinan experimentalmente a ciertas escalas de energía (o distancia), con un determinado error atribuible a las condiciones del experimento. Un avance espectacular en este sentido han sido los resultados de los experimentos de LEP, cuya precisión se ha puesto de manifiesto en el Simposio Leptón-Fotón y Conferencia Europea de Física de Altas Energías, celebrada en Ginebra del 25 de julio al 1 de agosto de 1991.

Con los resultados experimentales obtenidos la pasada década se llegó a la situación siguiente: la evolución de las constantes de acoplamiento era tal, que, dentro de los errores experimentales y con los constituyentes propios de la teoría estándar (quarks y leptones), no se podía decidir si las tres constantes de acoplamiento coincidían a determinadas distancias de interacción, llamadas de gran unificación. A estas distancias, la interacción no distinguiría entre quarks y leptones; por ello, un protón podría desintegrarse en leptones debido a esta interacción. La propia desintegración del protón es una consecuencia de las teorías de gran unificación conocida desde su formulación en los años 70. Sin embargo, la intensidad de la interacción correspondiente a las distancias donde las constantes de acoplamiento parecían unificarse entró en contradicción con los resultados experimentales que han estado buscando la desintegración del protón en la pasada década. Estos indican que la vida media del protón es mayor que 10^{32} años (cien billones de trillones de años).



MAGNITUD INVERSA de los acoplamientos de las distintas interacciones de la teoría estándar (fuerte, electromagnética y débil), representada en función del logaritmo de la energía de interacción. Los resultados se han obtenido a partir de los datos del colisionador LEP, a 100 GeV de energía, y haciendo evolucionar las constantes según la teoría estándar. De no aparecer nuevos ingredientes en la teoría, los resultados, con bandas de error incluidas, indican que no habrá unificación de las interacciones.

Una vez más, el colisionador LEP nos ha aclarado el problema. Con las nuevas medidas de la constante de acoplamiento de la interacción fuerte mencionadas antes, los errores experimentales se han reducido considerablemente; la evolución de las constantes de acoplamiento en el modelo estándar no dan un único punto de encuentro al disminuir la distancia de interacción. Ello se muestra con detalle en la ilustración correspondiente. Por tanto, no hay constante de gran unificación mínima, es decir, con sólo los constituyentes de la teoría estándar.

Ahora bien, si en el camino hacia energías cada vez más elevadas encontrásemos compañeros (supersimétricos) de los constituyentes de la teoría estándar, la evolución de las constantes de acoplamiento se modificaría de tal manera que a distancias más cortas volveríamos a hallar la unificación de las constantes de acoplamiento. Además, al ser menor la distancia de unificación, la constante de acoplamiento unificada sería menor que en el modelo mínimo y estaría de acuerdo con los límites experimentales actuales de la desintegración del protón indicados antes. Esta es la teoría de gran unificación supersimétrica. Por ello, uno de los principales retos que tiene planteados la física experimental de altas energías es el descubrimiento de los compañeros supersimétricos de los constituyentes de la teoría estándar, en el caso de que la naturaleza haya decidido seguir estas ideas para los últimos componentes de la materia y las fuerzas fundamentales entre ellos. (J. Bernabéu y J. A. Peñarrocha, del departamento de física teórica de la Universidad de Valencia.)

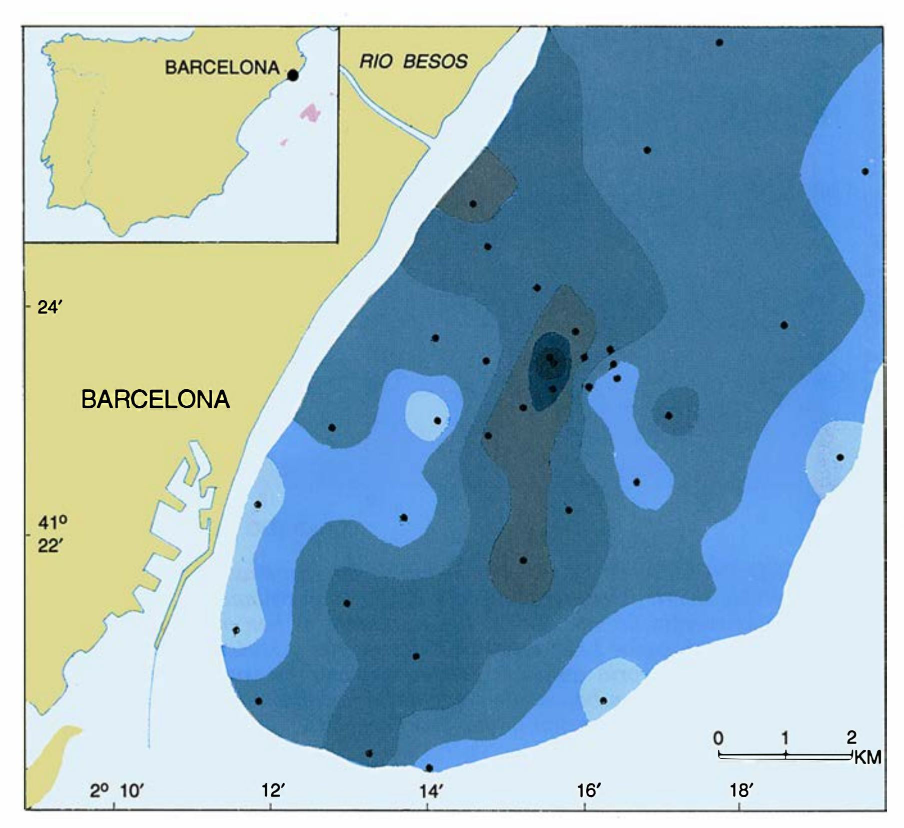
Medio ambiente

Verter o no verter: difícil dilema

La ciudad de Barcelona, como la de Nueva York y otras urbes costeras, viene vertiendo al mar una parte de las aguas fluviales depuradas y también los lodos procedentes de dicha depuración, éstos en los fondos aledaños, a una distancia y profundidad consideradas "seguras" por los especialistas.

Se consigue así, a criterio de los expertos, un doble objetivo. Primero, que la pluma de agua dulce que penetra en el mar, y que se instala sobre las aguas marinas, más densas, antes de mezclarse paulatinamente con ellas, no disperse los contaminantes de que las aguas fluviales van cargadas. En segundo lugar, que los lodos queden inmovilizados y, al menos en teoría, que el retorno a la ciudad de la elevada carga contaminante que poseen sea imposible.

En la práctica, sin embargo, las co-



LA DISTRIBUCION conjunta de las especies indicadoras de contaminación (más abundantes cuanto más contaminados los fondos) y de la diversidad específica (más alta cuanto menos contaminados) permite cartografiar zonas de contaminación frente a la costa de Barcelona, desde las más contaminadas (oscuro) *a las relativamente normales* (claro). [De J. D. ROS & M. J. CARDELL, 1991: Effect on benthic communities of inorganic matter and other pollutants (coast off Barcelona, Western Mediterranean]. *Toxicological and Environmental Chemistry, 31-32: 441-450.*

sas no son tan sencillas, como demostró recientemente un estudio pluridisciplinar en el que, a lo largo de dos años, de 1987 a 1989, se abordó el conocimiento sedimentológico, hidrográfico, químico, microbiológico, ecológico y toxicológico de la mancha de lodos de depuradora (Proyecto SPIO). En dicho estudio colaboraron varios centros del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (Instituto de Ciencias del Mar, Instituto de Química Bioorgánica) y diversos departamentos de la universidad de Barcelona (microbiología, ecología, química analítica), así como de las universidades de Metz y Nancy I. El estudio, patrocinado por la administración pública, fue dirigido por Ramon Parés, catedrático de microbiología de la Universidad de Barcelona.

El estudio sedimentológico estableció, entre otros aspectos, que el acúmulo de lodos vertidos desde hace una veintena de años forma un "pastel" de alrededor de 1 kilómetro de radio y de unos 2 metros de altura allí donde se abre la boca del emisario submarino, entre los 50 y los 60 metros de profundidad y a unos 5 kilómetros de la costa, frente a Sant Adrià del Besòs (al norte de la ciudad de Barcelona). La potencia del vertido va disminuyendo hacia los bordes del "pastel", pero es posible detectar los limos alóctonos, finos, orgánicos y cargados de contaminantes en toda una banda que se extiende paralela a la costa, en el sentido NE-SW, y que cubre una superficie aproximada de 5 por 2 kilómetros.

Los análisis químicos de estos sedimentos señalan valores elevados de materia orgánica (a pesar de que el proceso de depuración la elimina en gran parte) y muy elevados de metales pesados y microcontaminantes orgánicos: hidrocarburos petrogénicos, PCB, etc., procedentes de los desechos urbanos y de la actividad industrial y agrícola del área que baña el río Besòs, uno de los más contaminados de España.

En cuanto a los organismos que viven en estos fondos, suponen una representación empobrecida de los que pueblan las extensiones de arenas y fangos no afectados por los vertidos. En la zona central de la mancha, en concreto, sólo se detectan dos especies de anélidos poliquetos, *Capitella capitata* y *Malacoceros fuliginosus*, conocidas de fondos contaminados similares de otras costas marinas. Se trata de organismos resistentes, que, al tolerar la contaminación, verse libres de la competencia de otras especies y tener gran cantidad de materia orgánica a su disposición (son detritívoros), constituyen poblamientos muy numerosos (más de 1000 gusanos por litro de sedimento).

Estas comunidades son, sin embargo, monótonas: sólo dos especies en el centro del "pastel", que van aumentando hasta llegar a los valores propios de los fondos sedimentarios mediterráneos (50 o más especies por 100 centímetros cuadrados de sedimento). La diversidad específica, parámetro que mide el grado de estructuración y complejidad de las comunidades ecológicas, es también baja en las zonas más afectadas por los vertidos.

En razón de la distribución de las especies propias de fondos contaminados ("indicadoras de contaminación") y los valores de la diversidad específica en estos fondos, se han podido cartografiar los efectos del vertido de lodos sobre las comunidades bentónicas; la imagen que se obtiene coincide perfectamente con la distribución de sedimentos finos alóctonos ya señalada.

Los análisis toxicológicos indican que estos organismos resistentes acumulan en su cuerpo los contaminantes de los que los lodos están repletos; los valores de metales pesados y derivados de hidrocarburos son altos en algunas de las especies analizadas.

Es, pues, discutible que el procedimiento utilizado para eliminar los lodos de depuradora los inmovilice realmente. El estudio citado ha comprobado una movilidad física, reducida pero manifiesta: los fangos no se distribuyen regularmente alrededor de la boca del emisario submarino, sino que son distribuidos hacia el SW por la corriente dominante en la zona (del NE). Siguiendo la dirección de la banda de lodos contaminados, apenas éstos son indetectables (frente al extremo N del puerto de Barcelona) aparecen los fondos degradados, durante muchos años, por los vertidos de los colectores de la ciudad, o por acumulación de los materiales dragados del interior del puerto, que también se vierten periódicamente en aguas externas. Más al sur se abre la bocana del puerto de Barcelona y a continuación la desembocadura del Llobregat que, como la del Besòs, suponen también aportes notables de sedimentos contaminados al mar.

El conjunto, pues, es una faja submarina de fondos contaminados en grado diverso, que ribetea prácticamente todo el litoral barcelonés (lo

mismo es aplicable a Marsella, a Génova, etc.). Y aquí es oportuno hablar de otro tipo de movilidad de los contaminantes, la biología. Porque los metales pesados, los hidrocarburos y otros contaminantes perdurables que se encuentran en los sedimentos pasan a los animales detritívoros y sedimentívoros resistentes que pueden vivir en estas condiciones de estrés, y de éstos a los carnívoros y carroñeros que se alimentan de los anteriores, y así sucesivamente, hasta llegar al hombre.

Unas imágenes sorprendentes obtenidas en el estudio citado corresponden a las que facilitan los ecosondadores de alta precisión, que "fotografían" el fondo y sus accidentes e irregularidades. Siendo la plataforma de esta zona casi exclusivamente sedimentaria, el fondo es muy uniforme y no hay afloramientos rocosos ni grandes irregularidades, excepto de dos tipos: los emisarios submarinos (el de la depuradora citada y otros) y unas misteriosas líneas paralelas que, en grupos de dos, surcan el fondo a modo de enormes arañazos en prácticamente todas las direcciones, tanto sobre los fondos no afectados por los vertidos como sobre el "pastel" de lodos tóxicos. Se trata de las señales que sobre el fango dejan las puertas de los artes de arrastre de algunas embarcaciones de pesca, que, por lo tanto, capturan en este ambiente insalubre peces, con toda seguridad contaminados, destinados al consumo humano.

La propuesta de vertido de lodos de depuradora en las llanuras abisales tiene a su favor que a estas elevadas profundidades es imposible pescar directamente (aunque las gambas y otros crustáceos decápodos se capturan a 1000 metros de profundidad y más en nuestras aguas). Sin embargo, esto no elimina la posibilidad de que, a través de las cadenas tróficas (en las que se hallan implicados animales que realizan migraciones verticales muy importantes, desde los minúsculos crustáceos del zooplancton a los enormes cetáceos, que son grandes buceadores), los tóxicos inmovilizados en el abismo vuelvan a la superficie, al alcance del hombre. El dilema sigue, pues, planteado. (Joandomènec Ros, del departamento de ecología de la Universidad de Barcelona)

Test de Turing

Psicoterapeuta computarizado

Si Alan M. Turing hubiera podido presenciar el abarrote de medios de comunicación presentes en el auditorio del Computer Museum de Boston, aquel inglés precursor de la moderna informática hubiera sin duda murmurado para sí: "Sangrientamente pasmoso." Se trataba del primer concurso y premio Loebner, de periodicidad anual, en el cual unos programas competían contra otros, buscando salir airosos de una versión restringida del test de Turing, un criterio que aquel maestro propuso en 1950 para determinar si las máquinas pueden pensar.

Repartidos por el museo, diez jueces humanos se entregaban al juego de las sillas vacías con ocho terminales. Cada terminal estaba conectada con uno de los seis programas competidores o con uno de dos sucedáneos humanos. En cada caso, el único canal de comunicación que podría permitir al juez decidir si el contendiente situado en el otro extremo de la línea era persona o programa era una conversación por escrito y mecanografiada. Los diálogos, presentados en grandes pantallas que circundaban el auditorio, arrancaron de los presentes esporádicos bufidos de disgusto y auténticas carcajadas.

La escena no se desarrollaba precisamente en la atmósfera de serenidad intelectual que Turing había formulado. La propuesta de Turing era la esencia misma del "fair play": un juez humano interactuaría ora con un ordenador, ora con un humano, y trataría después de adivinar qué era cada quien. La comunicación se desarrollaría exclusivamente por teletipo; la ausencia de rostro, de hábitos personales molestos y demás rasgos humanos proporcionaría un campo de juego intelectualmente bien nivelado. ¿Lograría el programa engañar al juez, haciéndole pensar que era persona, tras un período de interrogatorio experto?

Robert Epstein, del Centro de Estudios de la Conducta de Cambridge, administrador del torneo, decidió limitar los temas de conversación, y dar así a los programas de hoy, bastante lerdos, alguna oportunidad de defenderse. Se les pidió a los jueces que calificasen a sus ocho interlocutores en una hoja de puntuación, graduándolos de más humano a más maquinal. Los jueces tenían después la obligación de trazar la divisoria entre los programas y las supuestas personas.

Cada uno de los jueces de Boston conversó sobre un tema distinto, desde vestuario femenino, pasando por Shakespeare, hasta la preparación de martinis. Entre bastidores, los funcionarios del museo temían que el concurso pudiera resultar un fracaso. ¿Qué sucedería si los jueces, a pesar de su inexperiencia, lograsen distinguir fácilmente a los programas de sus sucedáneos humanos? En este caso, la falta de noticias serían malas noticias.

Se preocupaban sin motivo. Algunas de las pantallas dejaron perplejo al público asistente, incapaz de establecer la naturaleza del interrogado. Así, por ejemplo, en la conversación sobre la obra teatral de Shakespeare las respuestas fueron pulcras y atinadas. Exhibieron a veces una erudición tan minuciosa de las piezas que podría tenerse por inhumana, pero en otras ocasiones mostraron la comprensión de las complejidades de sus tramas y personajes que se espera de un humano. El tema denominado "conversación caprichosa" suscitó todavía mayor atención a la pantalla de la terminal 5, mientras el juez número 9 luchaba a brazo partido con un personaje un tanto escurridizo que ocupaba el otro extremo de la línea.

Juez: ¿Cómo definiría caprichoso?

Terminal: Los caprichos son cambios de conducta repentinos, antojadizos y muchas veces peculiares... ¡rayos de luz en este mundo gris y sombrío!

Juez. Tiene una forma bastante pesimista de ver el mundo. ¿Ha tenido tropiezos alguna vez a causa de sus caprichos?

Terminal: La Tierra es mi tierra y soy ciudadano del mundo, ¿no está de acuerdo? En realidad no está usted hablando de mí, ¿verdad?

El juez 9 llegó más tarde a enfadarse por las respuestas evasivas:

Juez: ¿Es que no puede responder a una pregunta directa con una respuesta directa ni una sola vez?

Terminal: Las preguntas súbitas, atrevidas e inesperadas podrían muchas veces cogerme por sorpresa. Le gusta pensar que una sola vez voy a contestar, ¿verdad? A veces quisiera ser analista de sistemas.

Fue el desliz gramatical ("que una sola vez voy a contestar") lo que reveló a los expertos y cuasi-expertos atentos a la pantalla de la terminal 5 que se trataba de un programa. Recordaba demasiado la forma en que uno de los primeros programas de conversación, llamado Eliza, reflejaba en sus respuestas las frases de los humanos. Pero Eliza era un remedo de una sesión de psicoanálisis por libre asociación. Fuese programa o persona, la entidad que ocupaba el otro extremo de la terminal 5 daba trazas de ser una pizca psicótica.

Unos cuantos programas acabaron en el extremo humano de algunas hojas de puntuación. A pesar de que el conversador caprichoso no logró engañar al juez 9, sí lo consiguió con cinco de los diez jueces y salió del torneo, por así decirlo, con los 1500 dólares de premio bajo el brazo. (El dinero del premio fue donado por el patrocinador del torneo, un empresario neoyorquino llamado Hugh G. Loebner.) Según su creador, Joseph Weintraub, director de una firma de progra-

mación, su programa, llamado PC Therapist, se propone ayudar a los usuarios a "soltar vapor".

El segundo clasificado fue un programa llamado Turing, presentado por Kenneth M. Colby, pionero de la inteligencia artificial y profesor emérito de psiquiatría y ciencias de la conducta en la facultad de medicina de la Universidad de California en Los Angeles. El programa de Colby, especializado en los problemas que plantean las relaciones sentimentales, consiguió dársela con queso a dos de los jueces y ganó por poco al programa Julia, experto en conversación intrascendente. Los dos sucedáneos humanos manejaron sus temas con destreza. De todas formas, es posible que tanto Shakespeare como el vestuario femenino queden fuera del campo de competencia informática durante algunos de los años venideros.

Durante el desarrollo de las pruebas hubo quienes murmuraron que el test de Turing, por sí solo, podría no prestar servicio alguno en inteligencia artificial. A decir verdad, si PC Therapist es representativo de la vanguardia de los futuros vencedores, el concurso podría parecerse más a un circo informático que a un hito intelectual. Tampoco faltaron quienes expresaran sus dudas sobre el diseño del torneo. La aleatoriedad del capricho, por ejemplo, mana con igual facilidad de un microcircuito de silicio como de una mente humana. ¿No habría concedido este hecho a PC Therapist una injusta ventaja sobre sus rivales? Es posible que Turing así lo creyera.

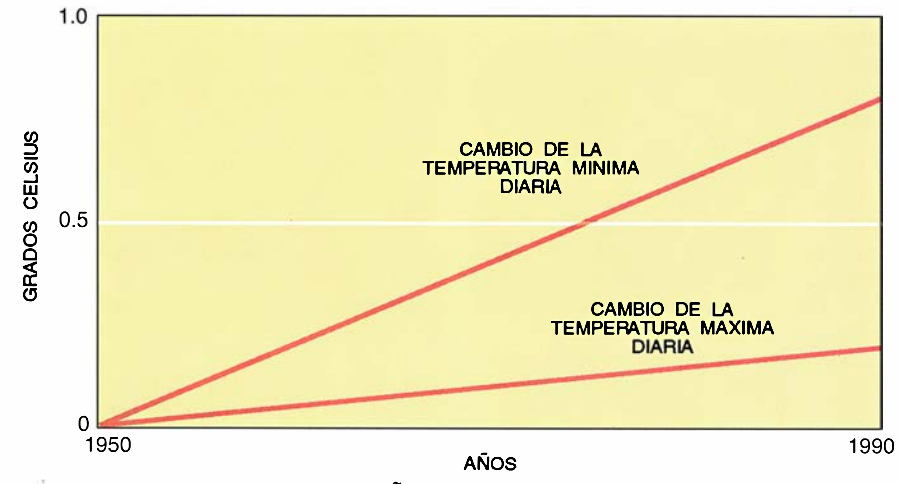
Pero tales pensamientos no surgieron durante la euforia del triunfo en el auditorio del Museo de Informática. Mientras Weintraub recitaba la dirección de su compañía a través de la megafonía del local, un periodista le intimaba a un compañero: "¡Con esto arrasa!" Tal vez los participantes del futuro salgan todavía mejor librados de un test de Turing que está en proyecto, sin limitación de temas y con una bolsa de 100.000 dólares. Para entonces, es de presumir que el profesor Turing imparta sobre el concurso su sonrisa benevolente y dé su bendición al silicio.

Calor nocturno

El lado bueno de los contaminantes

La amenaza del calentamiento global con que nos atemoriza el efecto invernadero ha promovido numerosos estudios sobre la incidencia de las altas temperaturas en la agricultura, la silvicultura y los ecosistemas naturales. El registro tenaz de las tendencias de la temperatura, durante cuarenta años, en Estados Unidos, ex-Unión Soviética y China, parece indicar que aquellos estudios no sirvieron para mucho.

Hasta ahora, todas las previsiones elaboradas sobre el calentamiento global, incluidas las realizada por el Comité Intergubernamental de las Naciones Unidas sobre Cambios Climáticos, partían del supuesto de que las temperaturas nocturnas subirían igual que las diurnas, debido a la acumulación en la atmósfera de los gases que contribuyen al efecto invernadero. Según un trabajo reciente, elaborado por un equipo del Centro Nacional de Datos sobre el Clima en Asheville y dirigido por Thomas R. Karl, en el hemisferio norte habría aumentado, sobre todo, la temperatura atmosférica nocturna. El calentamiento nocturno es relativamente benigno para las plantas, pues limita la deshidratación y otros daños producidos por el calentamiento diurno y reduce los efectos del enfriamiento nocturno.



DURANTE LOS ULTIMOS 40 AÑOS, las temperaturas mínimas, por lo común mínimas nocturnas, han aumentado apreciablemente en el hemisferio norte. Ha sido menor el ascenso registrado en las máximas.

Ha subido, ciertamente, la temperatura global promedio: entre 0,3 y 0,6 grados centígrados con respecto a los registros de hace cien años. Pero se trata de un incremento que corresponde de manera principal a las temperaturas mínimas nocturnas. Por otra parte, las temperaturas máximas, que se dan durante las horas diurnas, apenas han aumentado en los Estados Unidos y China, y sólo un poco en Rusia.

La inclusión de Rusia y China induce a pensar que el calentamiento del hemisferio norte durante este siglo es un fenómeno nocturno. En el estudio de los científicos de Asheville se combinan datos de 744 estaciones distribuidas sobre un 40 por ciento del territorio del hemisferio norte. Los datos relativos a Norteamérica se remontan a 1901; los procedentes de la antigua Unión Soviética a 1936, y se dispone de datos sobre el territorio chino desde 1951. Los datos americanos se corrigieron para tener en cuenta el incremento de la urbanización del país.

Estos hallazgos recientes ponen en tela de juicio los modelos climáticos de ordenador ideados para describir el comportamiento del efecto invernadero que no introducen diferencias sustanciales entre el calentamiento diurno y el nocturno. La prueba del calentamiento nocturno es tan sólida que está demandando una explicación física.

Se ha lanzado cierta hipótesis para justificar esa disparidad, aunque los expertos se pronuncian con prudencia: el incremento de calor nocturno podría deberse a la presencia de partículas microscópicas (por ejemplo, sulfatos producidos por el uso de combustibles sólidos) que reflejan, durante el día, la luz solar al espacio. Los sulfatos pararían así el efecto de la radiación solar que llega a la superficie de la Tierra; durante la noche, aumentarían la capacidad de absorción del calor radiado por la Tierra hacia la atmósfera. De donde resultaría que el calentamiento por efecto invernadero se concentraría durante la noche.

Pocos meses antes de la publicación de los datos de este efecto, apareció en *Tellus* un artículo de Robert J. Charlson en el que se describen los efectos climáticos de los sulfatos que, en el hemisferio norte, amortiguan el efecto invernadero. Quizá, se opinaba, sea prematuro conjugar ambas conclusiones, las de Karl y las de Charlson, pero la tentación es muy fuerte.

Estos aerosoles podrían contribuir también a la formación de nubes. Las observaciones de los satélites apuntan hacia un crecimiento de la cobertura nubosa del planeta. Con todo, no está

ni mucho menos claro cuál sea el papel global de las nubes en el efecto invernadero, ni tampoco la relación de los sulfatos con su formación y desarrollo.

A mayor abundamiento, ciertos trabajos estadísticos del Sudán respaldan la hipótesis de la intervención de los sulfatos, y corroboran, además, el calentamiento de la noche, generalizando así el fenómeno a todo el hemisferio septentrional. Tesis que viene apoyada también con datos de Australia, donde no se aprecia distinción noche-día en el aumento del calentamiento: el 90 por ciento de los sulfatos se emiten en el hemisferio norte. Por si fuera poco, el aumento del calentamiento en el hemisferio austral, mayor que el experimentado en el septentrional, abona la tesis del efecto apantallador de los sulfatos en el norte.

Urge, pues, volver a examinar de raíz los conceptos y los fenómenos relacionados con el calentamiento global, así como las políticas a seguir por los gobiernos. No sea que buscando un fin bueno estemos empleando medios equivocados. Lo que es obvio es que el calentamiento, aunque sea nocturno, seguirá fundiendo los glaciares.

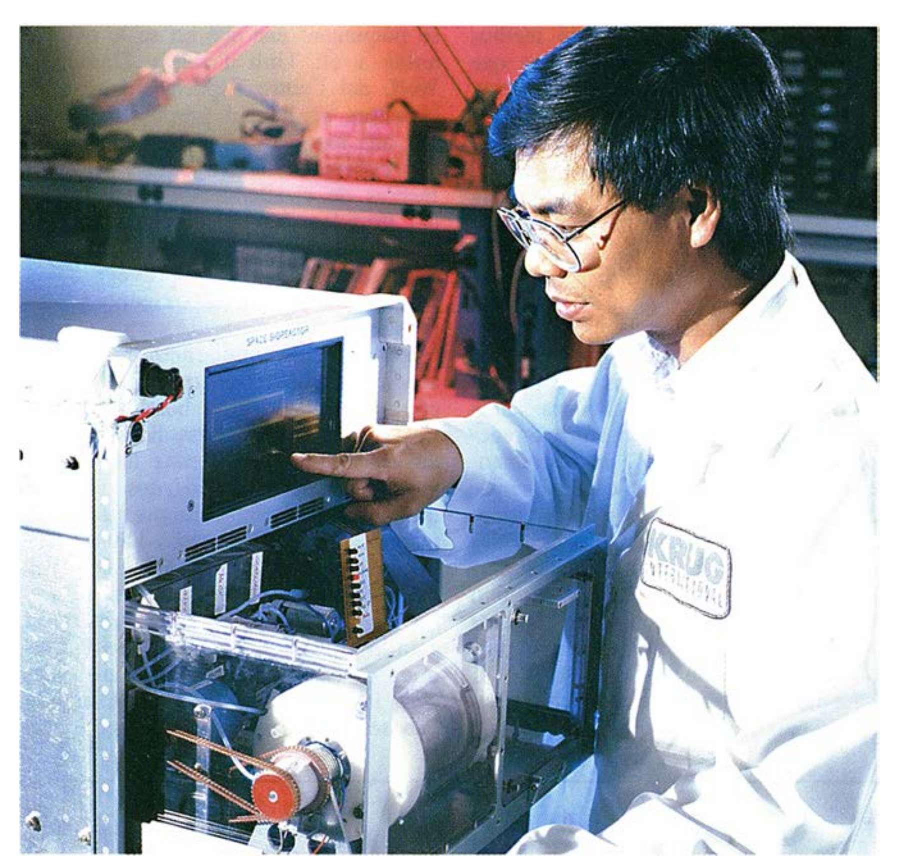
Maravillas de la cizalla

Cultivo de células que parecen tejidos

A la Administración Nacional de la Aeronáutica y el Espacio (NASA) le gusta fabricar artilugios que puedan tener su interés aquí en la tierra. Anda ahora muy orgullosa con su "biorreactor de paredes rotantes", un instrumento que permite cultivar células humanas de una forma tal que éstas adoptan las mismas características que las que se encuentran en los tejidos normales. Esto podría facilitar el cultivo de tejidos o incluso de órganos enteros para trasplantes, en un futuro más próximo del previamente esperado.

La idea que subyace en el biorreactor es tan elemental que más de uno se preguntará por qué no se le ocurrió antes a él. Tinh Trinh y David A. Wolf, del Centro Espacial Johnson en Houston, se habían propuesto encontrar una manera de proteger los delicados cultivos celulares de las elevadas fuerzas de cizallamiento generadas en los líquidos durante los despegues y aterrizajes del transbordador espacial, al tiempo que debían proveer a las células de suficiente oxígeno y nutrientes.

La solución que encontraron fue añadir un cilindro interno a un reactor convencional del tipo botella rodante. Las células están suspendidas en medio de cultivo líquido entre las paredes interna y externa de los dos cilindros que giran simultáneamente. De esta manera, la capa de medio líquido que queda entre las paredes gira como si fuese un cuerpo sólido, y las células no se ven sometidas a las fuerzas de cizalla típicas de líquidos en movimiento. Las células caen sin cesar, pero la rotación del recipiente impide que se desplacen en otras direcciones.



EL INSTRUMENTO para cultivo celular en rotación desarrollado por investigadores de la NASA permite la diferenciación celular en formas especializadas. Foto: Centro Espacial Johnson de la NASA.

Por ser porosa la pared interna del mismo, nutrientes y gases se difunden en los dos sentidos. Si añadimos un sistema de cierre hermético, un motor de velocidad variable y puertas para muestreo, ya tenemos el equipo completo. Trinh, Wolf y su colega Ray P. Schwarz patentaron su ingenio el año pasado.

Para su sorpresa, descubrieron que, en tierra firme, las células que crecían en ese ambiente con baja fricción se diferenciaban más que en los cultivos al uso. Estas células forman estructuras tridimensionales de varios milímetros de espesor y parecen el boceto de un tejido normal. Según Glenn Spauling, director del programa de biotecnología espacial en Johnson, las condiciones de baja fricción dentro del reactor son las apropiadas para que diferentes tipos de células crezcan en contacto íntimo unas junto a otras. Esa contigüidad favorece la mutua interacción química, motivo por el cual muestran una tendencia a diferenciarse en tejidos mayor que las células que crecen en otro tipo de cultivos.

Se han encontrado ya diversas aplicaciones al invento. Mary Lou Ingram, del Instituto Huntington de Investigaciones Médicas de Pasadena, usa el biorreactor para cultivar gliomas convincentes, un tipo de cánceres cerebrales fatales, con el fin de "adiestrar" a los linfocitos del paciente fuera del cuerpo para atacar el tumor antes de implantarlos en en el cerebro.

Mary Pat Moyer, microbióloga del Centro de Ciencias de la Salud de la Universidad de Texas en San Antonio, cultiva células de pulmón y de hígado productoras de enzimas y otros marcadores moleculares que normalmente sólo son detectados en tejidos sanos. Según explica, las células del intestino delgado se agrupan para formar estructuras parecidas a criptas de Lieberkühn, glándulas tubulares de la membrana mucosa del intestino, que degeneran en cultivos convencionales. En sus cultivos, también encuentra indicios moleculares de la formación de vasos sanguíneos.

Philip C. Johnson, del Centro de Ciencias de la Salud de la Universidad de Texas en Houston, cultiva células de epitelio de colon y ha reunido algunas pruebas provisionales de la idoneidad del sistema para multiplicar el virus de Norwalk, agente infeccioso de gran importancia que no puede propagarse en los cultivos habituales. Lisa Freed, de la Universidad de Harvard, usa el biorreactor para cultivar cartílago, obteniendo trozos mucho mayores que en otros sistemas. Finalmente J. Milburn Jessup, del Hospital Deaconess de Nueva Inglaterra en Boston, cultiva células de cáncer de colon que parecen tumores reales y que presentan antígenos de superficie, de interés, así se cree, en metástasis.

Los investigadores están impacientes por observar el comportamiento del biorreactor en el ambiente para el que fue diseñado: la microgravedad de una órbita cercana a la Tierra, donde el estrés al que están sometidas las células debería ser todavía menor que el que sufren en la superficie. A finales del año pasado se envió un biorreactor dotado de bolas de plástico en el transbordador espacial, y según Spaulding, los primeros datos confirman las simulaciones por ordenador de los patrones de flujo.

Jessup, por su parte, espera con ilusión el día en el que se usen biorreactores para cultivar órganos humanos para trasplantes en la estación espacial. ¿Por qué la obsesión por la la falta de peso, cuando los humanos nos desarrollamos en un ambiente con gravedad normal? Jessup explica que el embrión construye su propio esqueleto a medida que va creciendo, pero que los intentos de mimetizar el desarrollo de los órganos deben realizarse sin dicha estructura. Mientras tanto, bueno será ahondar en otros procesos, algunos tan delicados como el del crecimiento de las neuronas.

Cosmología

¿Sólo una gran explosión?

La teoría de la gran explosión ("big bang") goza de una aceptación que jamás se dispensó a ninguna otra de las teorías del universo en la historia de la civilización occidental. Descansa, sin embargo, sobre muchas hipótesis no comprobadas y, en ciertos casos, incontrastables. La cosmología de la gran explosión se ha convertido en una suerte de moda intelectual, donde la creencia subjetiva se mezcla, a partes iguales, con la verdad objetiva.

Ello no le ha impedido cobrar un auge arrollador. Se convocan conferencias internacionales de cosmología (que, tal como están las cosas, se reducen al modelo estándar de la gran explosión "caliente") a una cadencia de una por mes. Se le han dedicado extensos reportajes en el *New York Times*, en el *Economist* londinense y en el *Wall Street Journal*, en los cuales sólo se recogían entrevistas con creyentes en esa hipótesis. Obras de divulgación tan afamadas como *Los tres primeros minutos* de Steven Weinberg no abordan otra teoría.

En los diversos campos de la ciencia, las nuevas ideas brotan por lo común de jóvenes, que toman caminos distintos de los aceptados por sus maestros. Pero nuestros jóvenes muestran mayor intransigencia contra quienes osan apartarse de la fe en la gran explosión. Y lo peor de todo: los textos de cosmología han dejado de presentar abierto ese saber; se abraza sin rechistar la hipótesis y se empecinan los autores en buscarle justificación.

Poderosos mecanismos alimentan ese conformismo. Los avances científicos dependen de las posibilidades de financiación, equipamiento y revistas donde publicar. A esos recursos se accede por medio de un sistema de evaluación.

Quienes no nacimos ayer sabemos que los sistemas de evaluación y el arbitraje de los artículos constituyen una forma de censura. Resulta punto menos que imposible conseguir apoyo financiero o tiempo de observación en un telescopio, si no se presenta un proyecto concorde con las directrices del pensamiento oficial. Hace pocos años, a Halton C. Arp le denegaron tiempo de telescopio en los observatorios de Monte Palomar y Monte Wilson porque en su programa de observaciones había encontrado una y otra vez pruebas contrarias a la cosmología comúnmente aceptada. Los artículos críticos con la ortodoxia suelen rechazarse durante años, cuando no son bloqueados por los árbitros. La misma actitud se encuentra en los tribunales de oposiciones. Me apostaría algo a que ningún investigador joven querría ver en peligro su carrera científica escribiendo este ensayo u otro de idéntico tenor.

La situación es particularmente preocupante porque hay buenas razones para pensar que el modelo de la gran explosión adolece de graves incorrecciones. Un signo de que algo funciona mal lo comprobamos en el problema de la escala temporal. La versión más aceptada del modelo de la gran explosión nos propone un universo de edad comprendida entre los 7000 millones y los 13.000 millones de años. Intervalo tan dilatado de posibles edades deriva de la incertidumbre relativa al ritmo al que se expande el universo, un valor conocido como constante de Hubble.

De la comparación entre las observaciones y los cálculos de evolución estelar se infiere que las estrellas más viejas poseen una edad cifrada entre 13.000 y 15.000 millones de años, con una incertidumbre de más menos el 20 por ciento. La edad estimada de los elementos del sistema solar, basada en mediciones de elementos pesados radiactivos, es de unos 15.000 millones de años, también con cierto grado de incertidumbre. Si se toma un valor elevado de la constante de Hubble, y con ello una edad pequeña para el universo, el modelo más simple de gran explosión falla aparatosamente, porque el universo no puede ser más joven que los objetos que contiene. Tomar un valor pequeño para la constante de Hubble constituye una solución prendida con alfileres.

En vez de idear hipótesis alternativas a la de la gran explosión, los expertos prefieren retorcer las cosas y proponer que el ritmo de expansión es justo lo suficientemente pequeño como para que quepan las mayores edades estelares bien documentadas. O bien varían el modelo de la gran explosión añadiendo un parámetro arbitrario llamado constante cosmológica. Según esta versión de la historia, a la gran explosión del comienzo siguióle, primero, un período de espera y, luego, una expansión adicional.

La ubicua radiación cósmica de fondo de microondas, predicha por la teoría de la gran explosión, se esgrime como una de las pruebas más sólidas en su favor. Pero las mediciones nos demuestran que la distribución de la radiación de fondo es extraordinariamente suave. Los mapas de galaxias, por el contrario, muestran estructuras en todas las escalas.

Según la versión estándar de la teoría de la gran explosión, en los primeros estadios del universo la materia y la radiación se hallaban fuertemente acopladas; sólo más tarde se separarían sus caminos. Si ello fuera cierto, la radiación cósmica de fondo de microondas manifestaría la impronta de la irregular distribución de materia que dio origen a la formación de galaxias. Pero la radiación cósmica de fondo aparece, por contra, uniforme al menos en una parte cada 100.000, nivel muy cercano al cual el modelo de la gran explosión debe ser abandonado o sustancialmente modificado.

Dentro del marco de la gran explosión "caliente", ninguna teoría explica satisfactoriamente la formación de galaxias y macroestructuras. Las galaxias pueden surgir por colapso gravitacional en un universo en expansión, a no ser que uno admita, sin explicación, la presencia de grandes fluctuaciones de densidad en el universo primitivo. Bajo la influencia de los físicos de partículas, los cosmólogos proponen ahora que estas fluctuaciones tuvieron lugar en un primitivo estadio de la gran explosión o bien que estuvieron causadas por unas exóticas entidades llamadas cuerdas cósmicas. Ninguna de tales ideas admite comprobación directa.

El modelo inflacionario, una idea nacida en la última década, atribuye la uniformidad de la radiación cósmica y la cantidad de materia presente en el universo a un período de expansión extremadamente rápida que se desarrolló en los comienzos del universo. Una vez más, la inflación es un añadido sin verificar a la hipótesis tradicional de la gran explosión.

Esta forma de inflación es arbitraria, y cuando pierda su vigor, tal como la historia de la ciencia sugiere que ocurrirá, nuestros hijos se preguntarán el motivo de su popularidad. La idea de la inflación aparece de manera bastante natural en la cosmología del estado estacionario. Creo que es digna de consideración una variante de ésta, propuesta hace poco por Arp, Fred Hoyle, Jayant V. Narlikar, N. C. Wickramasinghe y yo mismo. En ella, la creación tiene lugar en una serie de pequeños estallidos; en ese modelo, las microondas cósmicas son generadas por las galaxias y nunca acopladas a ellas. Este modelo es, cuando menos, una hipótesis alternativa y viable que puede explicar todo lo que vemos. Puede que haya otros.

¿A qué se debe el éxito de aceptación de la hipótesis de la gran explosión por parte de los cosmólogos? Todo evoluciona en función del tiempo, excepto las leyes de la física. Por tanto, sólo hay dos inmutables: el acto de la creación y las leyes de la física, que resultan en su forma definitiva de tal acto. El "big bang" refleja, en último término, la búsqueda de la creación y de un principio que llevan a cabo algunos cosmólogos. Esta búsqueda debe situarse en el reino de la metafísica, no de la ciencia. (Geoffrey Burbidge, profesor de física de la Universidad de California en San Diego y ex-director del Observatorio Nacional de Kitt Peak.)

Paleoecología

Reliquias vivientes del océano primitivo

En dos lagos alcalinos se han descubierto formaciones sedimentarias calcáreas, construidas por bacterias, a imagen de lo que sucedió, a escala global, en los orígenes de la Tierra. Ello nos indica que el océano primitivo era muy alcalino, con abundancia de potasio y cloruro sódico.

Condición necesaria para rehacer la historia de la vida es la de conocer la composición original del océano primitivo. Cinco años atrás presentábamos un modelo geoquímico del que resultaba un oceano precámbrico notablemente alcalino. (El Precámbrico abarca el período transcurrido desde la



ESTAMOS EN LA ESTACION SECA, cuando pueden observarse estromalitos libres del lago de Satonda.

formación de la Tierra hasta hace unos quinientos millones de años.) Basábamos nuestra hipótesis en la observación de que, durante los procesos de meteorización, el ácido carbónico reacciona prestamente con los silicatos de las rocas. Cuando las soluciones producidas se volatilizan, el carbonato cálcico y el carbonato de magnesio precipitan, mientras que los carbonatos de los metales alcalinos sodio y potasio permanecen en solución.

La hipótesis sobre el océano primitivo no sólo es coherente con la termodinámica y la cinética de la meteorización, sino que recibe también el respaldo de la observación en lagos alcalinos actuales. Asumimos, de partida, que los únicos fósiles precámbricos son algas calcáreas, las microbialitas; si forman estructuras laminares constituyen los estromatolitos y, si carecen de estructura interna, trombolitos. Los paleontólogos coinciden en considerarlas colonias calcificadas de cianobacterias (algas azulverdosas). Las cianobacterias gozan hoy de amplia representación en los océanos, si bien no se integran en estromatolitos calcificados. (Los estromatolitos actuales, que medran en las Bahamas y otras zonas cálidas de relieve uniforme, se aglutinan mediante partículas calcáreas arrastradas por la corriente.) Si nuestra hipótesis del océano primitivo resulta ser correcta, las microbialitas calcificadas sólo aparecerían, si las hubiera, en un medio alcalino.



TROMBOLITO en forma de cornamenta de alce, a 15 metros de profundidad en el lago Van. La estructura mide metro y medio de anchura.

En su búsqueda, emprendimos dos expediciones subacuáticas en sendos lagos alcalinos. En 1986 nos sumergimos en un lago de cráter de la isla de Satonda, en Indonesia, cuyas aguas son de origen marino y alcalino; en 1989 y 1990 investigamos el mayor lago sódico del planeta, el Van, en Anatolia oriental. En ambos lagos hallamos lo esperado: ingentes microbialitas, que superaban los ejemplares hasta entonces conocidos. En Satonda las hay de 23 metros; en el lago Van, de hasta 40 metros.

Las inmersiones tienen mucho de viaje en el túnel del tiempo hacia el Precámbrico, donde se respira, junto a las columnas calcáreas, el silencio del nacimiento del océano. Las estructuras revisten formas de columnas, candelabros, brazos, con escarificaciones verdosas debidas al pigmento cianobacteriano. El microscopio electrónico nos descubre que están constituidas por colonias de cianobacterias esféricas. La capa viva apenas si se extiende unas décimas de milímetro de espesor, que calcifica prestamente. Se supone que en el lago Van precipita aragonito y, calcita, en el de Satonda.

Ambos lagos difieren bastante en lo relativo al lugar, temperatura, salinidad, *p*H y alcalinidad. El de Satonda se halla en el trópico; la temperatura del agua es allí de 30 grados y alcanza un 90 por ciento de salinidad; el lago está separado del mar por una barrera muy fina. Posee, sin embargo, mayor alcalinidad que el mar: 3,4 miliequivalentes por litro. (Por alcalinidad se entiende la capacidad de combinación de ácidos y se expresa generalmente en equivalentes o miliequivalentes por litro de agua. Prácticamente representa la diferencia que existe entre los aniones fuertes y los cationes en la composición del agua, y, en su mayor parte, es atribuible al calcio.) También su *p*H es mayor, de 8,43.

El lago Van está situado a 1650 metros. Se trata de uno de los mayores de la Tierra, con 3570 kilómetros cuadrados y 450 metros de profundidad. Su temperatura en verano es de 3 grados; la salinidad alcanza el 62 por ciento. El *p*H ronda el 9,8; la alcalinidad llega a los 150 miliequivalentes.

Para la secreción de carbonatos cálcicos no son decisivos ni la temperatura, ni el valor del *p*H, ni la alcalinidad, considerados cada factor por separado. Sí importa la saturación con respecto al mineral precipitado. La saturación tiene que ver con el producto de las concentraciones de los iones implicados en la precipitación (calcio

y carbonatos en calcita y aragonito, respectivamente) en relación con la solubilidad teórica a esa temperatura. Si hay más iones de los teóricamente posibles, entonces la razón de concentraciones es mayor que la unidad, el índice de saturación es positivo y nos hallamos en una situación de supersaturación; en la infrasaturación, el índice es negativo.

En último término, el carbonato cálcico precipita sólo mediante acción enzimática, como ocurre con la formación de la cáscara del huevo o los huesos. Pero si el agua está infrasaturada, se rebasa el umbral de precipitación con la remoción de dióxido de carbono, cuyo origen habrá que buscarlo en la fotosíntesis de las cianobacterias.

El carbonato cálcico puede formar soluciones de alto grado de infrasaturación antes de precipitar espontáneamente; lo contrario del yeso, que cristaliza en cuanto se satura (índice = 0). Lo mismo en el lago de Satonda que en el Van se observó un índice de valor +0,8. En la superficie del océano actual, por contra, fluctúa entre +0,4 y +0,6; a muy bajas profundidades se llega incluso a la infrasaturación (lo que no impide la formación de carbonato cálcico de origen enzimático).

El factor común que favorece la aparición de microbialitas podría descansar en la supersaturación posterior de calcita y aragonito. Como en sus contrapartidas lagunares actuales, dicha supersaturación tendría su origen en una concentración elevada de carbonatos, de acuerdo con la hipótesis de un océano sódico.

Las microbialitas de los lagos de Satonda y Van distínguense de las precámbricas por su desmedido crecimiento. Creemos tener razones que resuelven esa contradicción aparente. En Satonda, los cúmulos crecen en los márgenes escarpados del cráter volcánico; observados perpendicularmente desde la superficie de las aguas, sólo se aprecia un espesor de pocos decímetros. En el lago Van, el grosor es todavía más endeble: las aguas que ascienden desde el fondo son muy ricas en calcio, dejando que las estructuras alcancen alturas insospechadas. En los puntos de emersión de las columnas se origina una notable supersaturación, con precipitación de calcita sin intervención de las cianobacterias; la calcita forma así una matriz apta para ser colonizada por las bacterias. Las columnas poseen poroso su interior. Cuando extrajimos muestras del agua de ese interior, comprobamos que era mucho más fría que la del exterior; en algunas columnas veíase, incluso, la salida de agua subterránea.

De acuerdo con las dataciones realizadas por Mebus Geyh y Gerd Hennig, del Departamento Federal de Investigaciones Subterráneas de Hannover, y de Wilhelm Mook, de la Universidad de Gröningen, con métodos de carbono radiactivo y uranio-torio, las columnas del lago Van llevan creciendo más de 4400 años, en tanto que las microbialitas de Satonda tendrían una vida activa de 4000 años. Ello pone de manifiesto que las teorías vigentes según las cuales las causas responsables de la desaparición de los estromatolitos de los mares de la Tierra serían las ocilaciones de temperatura y la acción depredadora de organismos más desarrollados sobre los cúmulos no operarían aquí. En ambos lagos viven organismos evolucionados sobre las estructuras algales, y la diferencia de temperatura entre uno y otro es de unos 30 grados.

Por consiguiente, la única explicación que nos queda es la de la caída progresiva de la supersaturación de carbonatos provocada por la disminución gradual de la concentración de carbonato cálcico en los mares. Así pues, parece cada vez más improbable un océano primitivo ácido en conexión con una atmósfera primitiva de altas presiones de dióxido de carbono. (Stephan Kempe, Günther Landmann, Andreas Lipp y Andreas Reimer, de la Universidad de Hamburgo; Jozef Kazmierczak, de la Academia Polaca de las Ciencias, y Tosum Konuk, de la Universidad de Izmir.)

Colonización de América

Precolombinos

El asunto está embrollado. El quinto centenario del descubrimiento colombino ha despertado la natural curiosidad acerca de las gentes que primero pusieron pie en el Nuevo Mundo, cuyos descendientes eran los que estaban en la costa viendo cómo se acercaban las carabelas españolas. ¿Cuándo y cómo llegaron los primeros americanos?

Diez años atrás, la mayoría de los arqueólogos hubieran dado una respuesta sencilla: el hombre llegó al Nuevo Mundo cruzando una lengua de tierra firme desde el nordeste asiático, hace unos 12.000 años, y se extendió con rapidez hacia el sur. Pero a lo largo de la última década han venido acumulándose pruebas (arqueológicas, genéticas y lingüísticas) que nos inclinan a pensar que la llegada del hombre a América se produjo varios miles, o incluso varias decenas de miles de años antes: "Estamos lejos de la resolución de este rompecabezas", reconoce Stephen L. Zegura, antropólogo de la Universidad de Arizona.

La vieja teoría, a menudo conocida con el nombre de Clovis, se formuló en los años treinta de nuestro siglo, cuando los arqueólogos descubrieron en el yacimiento de Clovis (Nuevo México) una industria lítica de hojas con acanaladura. Parecían haber servido como cuchillos o como puntas de proyectil. Desde entonces se han desenterrado puntas de Clovis en excavaciones a lo largo de todo el continente. Las más antiguas se han datado en 11.000 años.

La mayoría de los arqueólogos llegaron a admitir que el grupo de Clovis, cazadores de grandes animales, constituyeron los primeros americanos, y que sus antepasados habían emigrado desde Asia unos mil años antes, durante la edad del Hielo, cuando buena parte del agua del planeta estaba retenida en los hielos y Siberia se comunicaba con Alaska a través de Beringia, una lengua de tierra.

A mediados de los ochenta empezó a ganar adeptos una nueva versión de la historia del grupo Clovis. La teoría fue propuesta por Christy G. Turner II, de la Universidad estatal de Arizona, experto en dientes, Joseph H. Greenberg, de la Universidad de Stanford, filólogo y lingüista, y por S. L. Zegura, especialista en genética. Los tres llegaron a la conclusión, a partir de sus análisis lingüísticos, genéticos y dentarios, de que todos los descendientes de los actuales indígenas arribaron en tres oleadas distintas. Los autores sostenían que sus datos, aunque no confirmaban la cronología de los grupos de Clovis, eran coherentes con ella.

Mientras Turner y sus colegas daban a conocer esta nueva teoría de las tres oleadas para los grupos Clovis, crecían la documentación arqueológica que respaldaba una ocupación muy anterior a la presencia de la cultura de Clovis. Los yacimientos pre-Clovis que ofrecen menos dudas son los de Monte Verde (Chile) y Meadowcroft (Estados Unidos).

El investigador que ha excavado Monte Verde, Tom D. Dillehay, de la Universidad de Kentucky, habla del hallazgo de útiles de piedra, de los restos de una cabaña y de otros indicios de un asentamiento que se ocupó hace 13.000 años. Ha defendido, asimismo, el carácter instrumental de ciertos fragmentos líticos que tendrían unos 33.000 años de antigüedad. El responsable de la excavación de Meadowcroft, James S. Adovasio, de Mercyhurst, ha hecho público su hallazgo de instrumentos líticos, huesos de animales y carbón vegetal, con una edad de 15.000, si no de 19.000 años, quizá.

De los supuestos yacimientos precedentes al pueblo de Clovis, el más espectacular y controvertido es, sin duda, el abrigo de Piedra Furada (Brasil), excavado por el arqueólogo francés Niède Guidon, del Instituto de Ciencias Sociales Avanzadas de París. Alega haber desenterrado una industria lítica y otros elementos producidos por el hombre, todo ello fechado en 48.000 años.

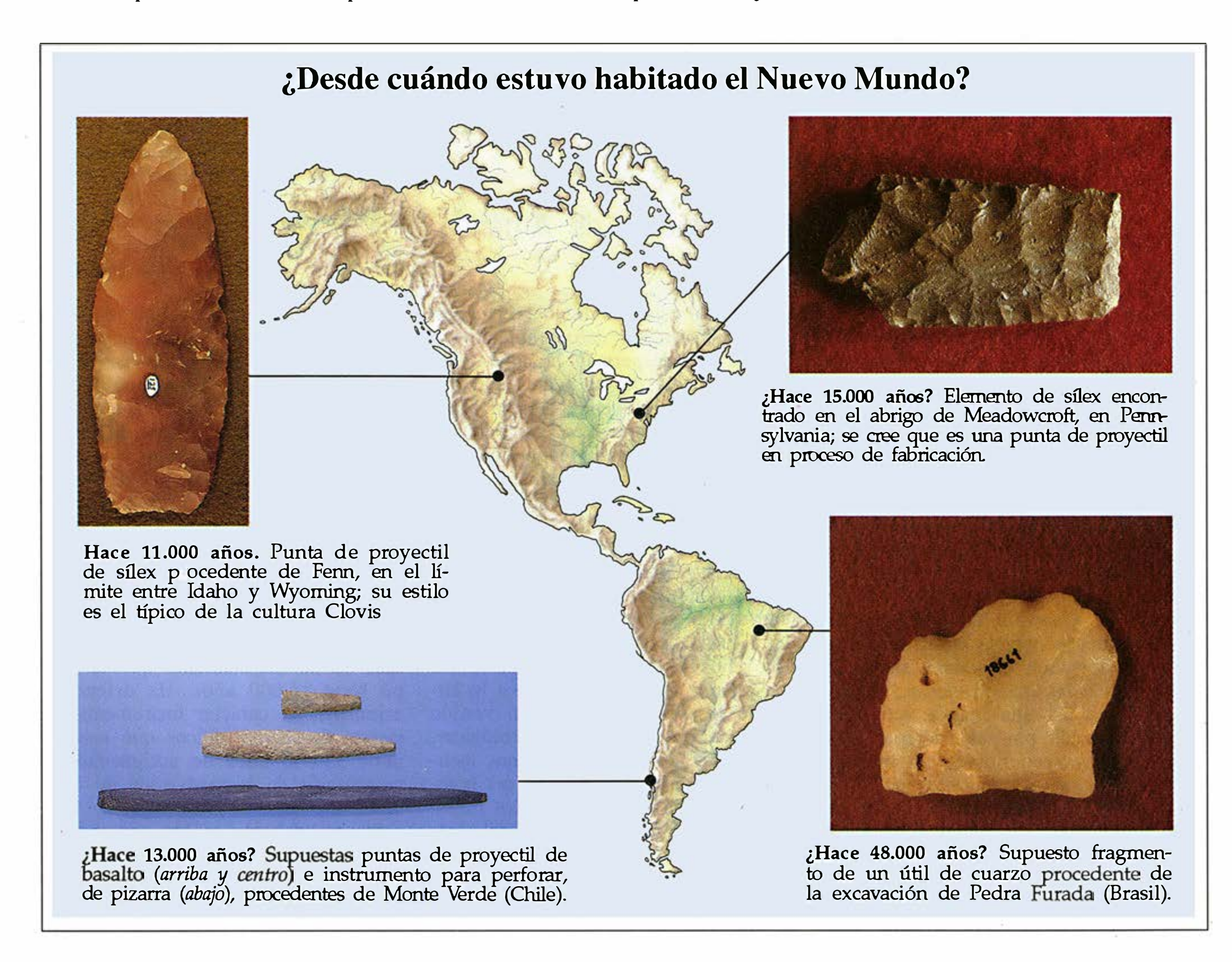
Otros yacimientos pre-Clovis conocidos serían los de las cuevas de Bluefish, en los territorios canadienses del Yukón, cuyos excavadores aseguran haber encontrado instrumentos en hueso de 25.000 años de edad; Taima-taima, en Venezuela, que ha dado un hueso de mastodonte, fracturado intencionadamente, de hace 13.000 años; y la cueva de Orogrande, en Nuevo México. El excavador de esta última, Richard S. MacNeish, de la Fundación Andover de Investigaciones Arqueológicas, dice haber encontrado, en el barro endurecido de un hogar, la impresión de la palma de una mano, de hace 28.000 años, así como instrumental lítico 10.000 años más viejo.

Contemporáneamente, los expertos en genética han ido reuniendo pruebas que respaldan las migraciones anteriores al tiempo de Clovis. Zegura, a quien debemos, con Greenberg y Turner, la teoría de Clovis modificada, o neo-Clovis, opina que el hombre pudo haber llegado en un momento transcurrido entre los 15.000 y los 30.000 años, y que quizá no lo hizo en tres oleadas, sino en una sola, que se dividió más tarde. Luigi L. Cavalli-Sforza, de la Universidad de Stanford, tras efectuar la comparación del ADN de los indígenas americanos con el de los asiáticos, ha llegado a la conclusión de que ambos se separaron en Asia hace unos 30.000 años.

Douglas C. Wallace, de la Universidad de Emory, abunda en la misma fecha partiendo de análisis del ADN heredado únicamente por vía materna. El equipo de Wallace asegura que prácticamente todos los actuales indígenas americanos descienden de cuatro mujeres, de linaje asiático, que vivieron hace unos 30.000 años, 10.000 años arriba o abajo. Según la nota publicada por Wallace y sus colegas en el número de enero de 1992 de *Genetics*, en el caso de que estas mujeres formasen parte de un grupo que pasó hacia el Nuevo Mundo "esta cronología nos llevaría a la idea de que América fue colonizada antes de las fechas ligadas a los instrumentos más antiguos del tipo Clovis".

Los resultados de Wallace han sido cuestionados por el grupo que encabezan Richard H. Ward y Svante Pääbo, de la Universidad de Munich. Ward y Pääbo no han conseguido aislar las cuatro líneas maternas a las que se refería el equipo de Wallace. Sólo ven una mujer predecesora de los actuales indígenas americanos, que debió vivir hace unos 60.000 años, probablemente en Asia. También afirman que es imposible saber, a partir del rastreo genético del material disponible, el momento en que los descendientes de esa mujer pasaron al Nuevo Mundo.

El acopio de nuevos datos podría ayudar a resolver la cuestión. Wallace confía en que una profunda investigación genética de la población del nordeste asiático aportará, como resultado, una mayor precisión acerca de cuándo y dónde empezó la separación de los proto-americanos. William W. Hauswirth, de la Universidad de Florida,



Hace 11.000 años. Punta de proyectil de sílex p ocedente de Fenn, en el límite entre Idaho y Wyoming; su estilo es el típico de la cultura Clovis

¿Hace 15.000 años? Elemento de sílex encontrado en el abrigo de Meadowcroft, en Pennsylvania; se cree que es una punta de proyectil en proceso de fabricación.

¿Hace 13.000 años? Supuestas puntas de proyectil de basalto (*arriba y centro*) e instrumento para perforar, de pizarra (*abajo*), procedentes de Monte Verde (Chile).

¿Hace 48.000 años? Supuesto fragmento de un útil de cuarzo procedente de la excavación de Pedra Furada (Brasil).

investiga en la actualidad el ADN procedente de un conjunto de 91 cráneos, de hasta 8000 años de antigüedad, encontrados en un pantano de Florida en 1984. El estudio debería servir para conocer el ritmo evolutivo del ADN.

La tesis de la remota antigüedad de los grupos anteriores a la cultura de Clovis viene defendida también por un experta en filología comparada y lingüística, Johanna B. Nichols, de la Universidad de California en Berkeley, quien sugirió, en 1990 y en la revista *Language*, que la cifra de 12.000 años era muy corta para explicar la extraordinaria diversidad de lenguas que encontramos entre los indígenas americanos. Si aceptamos que América fue poblada por un único grupo, que hablaba una sola lengua, su llegada tuvo que producirse hace entre 50.000 y 60.000 años. Otra explicación que propone Nichols sería la arribada de una docena de oleadas migratorias, cada una con su propia lengua, hace entre 30.000 y 40.000 años; los resultados habrían sido los mismos.

Discrepa de esas hipótesis Merritt Ruhlen, lingüista no adscrito a ningún organismo y próximo a Greenberg y a su teoría de las tres oleadas migratorias. Asegura que basarse únicamente en las lenguas no puede proporcionar una cronología válida y que las fechas clásicas del grupo Clovis pueden explicar la diversidad de lenguas de los indígenas americanos.

Otros defensores de la teoría de Clovis han cuestionado la validez de los datos procedentes de yacimientos pre-Clovis. En un próximo número de *American Antiquity*, Kenneth B. Tankersley, del Museo del estado de Illinois, cuestiona las fechas de carbono 14 procedentes del yacimiento de Meadowscroft, porque supone contaminadas las muestras. Por su parte C. Vance Haynes, de la Universidad de Arizona, una de las primeras autoridades en la cultura de Clovis, cree que los "útiles" de la cueva de Orogrande, en Nuevo México, son sólo piedras rotas. En el caso de Monte Verde, aunque parece aceptar su aparente validez, afirma que se trata de un caso único y aislado y que, según el investigador, "necesita dejar de estar solo".

El más firme defensor de la teoría de Clovis es Thomas F. Lynch, antropólogo adscrito a la Universidad de Cornell. Cree que los argumentos en favor de la teoría pre-Clovis son producto de sentimentalismo y de espejismos. "La gente quiere creer esto, igual que quiere creer en la curación del cáncer". Predice también que los supuestos hábitats pre-Clovis caerán en el descrédito, como lo han hecho muchos otros en los últimos 50 años.

Lynch aduce, y otros con él, que hace más de 14.000 años tanto la lengua de tierra firme de Beringia como el Canadá estaban bajo una gran capa de hielo que impediría el paso. Si aquellas gentes consiguieron atravesar la zona hace 15.000 o 20.000 o 50.000 años, ¿por qué, además, no nos dejaron más señales de su tránsito?

Alan L. Bryan, de la Universidad de Alberta, defiende la teoría pre-Clovis con la misma energía que emplea Lynch para atacarla. Aquellos pueblos, replica, ataca, pudieron haber descendido costeando en primitivas canoas hace incluso 100.000 años, en vez de atravesar el continente por su interior, cubierto de hielos. Cuando terminó la edad del Hielo el nivel del mar subió e hizo desaparecer los vestigios de aquellos que vivieron cerca de las costas.

Han llegado a proponerse opiniones más radicales acerca de las rutas migratorias, como la adelantada por Robson Bonichsen, jefe del Centro para el Estudio de los Primeros Americanos en la Universidad estatal de Oregón. El hombre pudo haber cruzado desde Australia a Sudamérica tanto por vía antártica como saltando de isla en isla a través del Pacífico. Guidon, el excavador del yacimiento de Pedra Furada, no descarta un paso transatlántico desde Africa, y asegura que "tenemos que pensar en otros caminos para llegar al Nuevo Mundo que no sean el de Beringia".

David J. Meltzer, antropólogo de la Universidad Metodista del Sur, está de acuerdo en que, para explicar la gran variedad de datos que poseemos habría que recurrir a esquemas poblacionales más complejos. Apunta que quizás se produjo la presencia de humanos en el Nuevo Mundo en tiempos muy remotos, como lo atestiguan los hallazgos de Guidon y otros investigadores, si bien aquellos primeros pobladores se extinguieron sin dejar ningún tipo de pruebas genéticas ni lingüísticas.

Dennis J. Stanford tiene que pelear en su trabajo con opiniones tan dispares. Encargado de la dirección de un programa de investigación sobre los paleo-indios en la Institución Smithsoniana, está dándole los últimos retoques a la preparación de una exposición sobre el poblamiento del Nuevo Mundo. Nos declara que se esforzará por ofrecer una visión equilibrada del estado de la cuestión mediante la presentación de las diferentes hipótesis. En la exposición se incluirán también mitos sobre los orígenes de los propios indígenas americanos, en la mayoría de los cuales se recoge la idea de que sus antepasados vivieron siempre en el Nuevo Mundo. Entre agudo y cauto apostilla: "Quién sabe si nuestras ideas no son también mitos".

De cerca

Fotos y texto: Satoshi Kuribayashi

Bulbul libador

La imagen fija que tenemos de ave en revoloteo en torno a un mismo punto es la del colibrí; con sus 20 gramos de peso, se suspende en el aire, erguido sobre su cola, y mueve las alas adelante y atrás, creando un chorro de aire descendente que le empuja hacia arriba; la cantidad de movimiento conducido hacia abajo por la corriente es igual al peso del animal. Menos conocidos son estos mecanismos en aves revoloteadoras de mayor porte, como la del bulbul (*Hypsopetes amaurotis*) de la fotografía. Incapaz de derrochar más energía que la gastada en el par de segundos que dura su libación del néctar de las flores.

Los bulbules recuerdan, en su morfología, a nuestros tordos. Viven en zonas boscosas de una amplia franja que se extiende desde Africa hasta el Japón, pasando por el sureste asiático. Poseen alas cortas, inadecuadas para largos vuelos.

Las viejas taxonomías incluían esos paseriformes en el suborden de las aves canoras. Aludíase con ello a su canto melodioso que, en ciertos casos, amenizan el día entero y resisten cualquier tipo de comparación con nuestros ruiseñores.

Suelen construir nidos grandes, en escudilla, cerca de las ramas bajas de los árboles o arbustos; los tejen con ramitas y hierbas, revistiéndolos de plumas, pelos y hojas. En la cría de los polluelos colaboran ambos progenitores.

La toma de la fotografía se hizo delante de la flor de la camelia que tenemos en un extremo del jardín. Colocamos en un principio un sensor de rayos infrarrojos y cuatro focos de flash electrónico dirigidos hacia ella; sorprendido por el montaje, y alarmado, el bulbul no quiso acercarse. Prescindimos de la aparatosidad y nos limitamos a un sensor de temperatura. Llegó entonces él con sus trinos.





distancia focal: 75 mm
diafragma: F = 16
exposición: 1/6.000 segundo
película: ISO = 100



Discos de acreción en estrellas binarias

Los discos de materia se organizan de forma espontánea alrededor de objetos de estructura muy dispar, desde estrellas recién nacidas hasta cuásares. El estudio de las estrellas variables nos permite conocer el comportamiento de esos discos

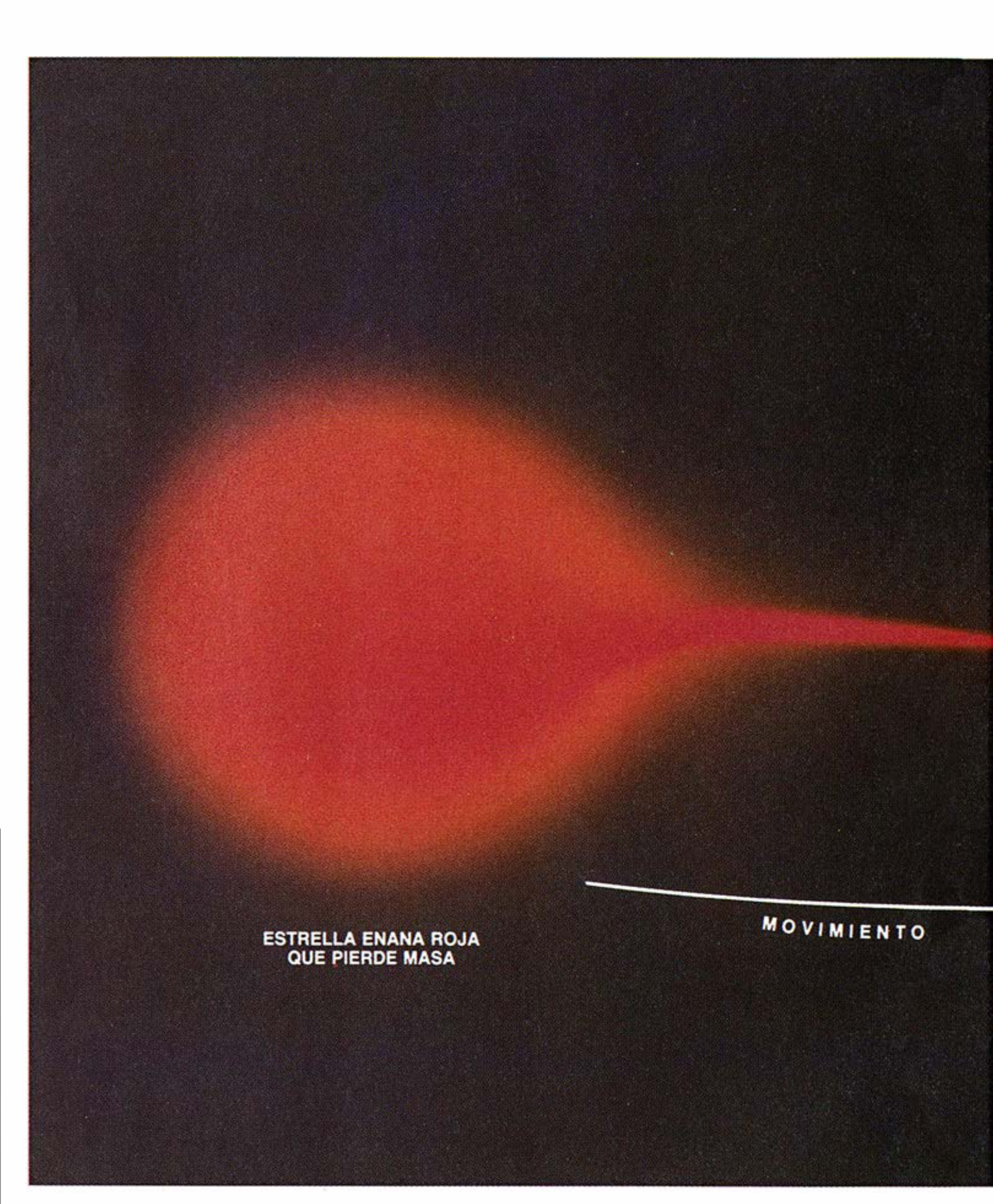
John K. Cannizzo y Ronald H. Kaitchuk

Las estructuras en disco, los discos, abundan en los cielos. En la mayoría de los casos, rodean un objeto central de gran masa, por ejemplo, una estrella o un agujero negro. La materia del disco suele avanzar hacia el interior hasta depositarse, con el tiempo, sobre el objeto central. Ese es el motivo de que se les llame discos de acreción. Se les implica en fenómenos tan dispares como la formación de estrellas y planetas o el abastecimiento energético de los cuásares.

Los tipos mejor estudiados son los que residen en los sistemas de estrellas binarias sometidas a interacción. Los autores han fijado su atención en las variables cataclísmicas, clase misteriosa e inestable de estrellas binarias en interacción que pueden centuplicar su brillo en sólo unas horas. Estos sistemas, fascinantes por derecho propio, sirven de banco de pruebas para desentrañar la física de los discos de acreción.

Alguien podría maravillarse de esa frecuencia con que se desarrollan en el universo morfologías discoidales altamente organizadas. La verdad es que

JOHN K. CANNIZZO y RONALD H. KAITCHUCK comparten idéntico interés por los discos de acreción y las estrellas binarias en interacción. Cannizzo se doctoró en astrofísica en 1984 por la Universidad de Texas en Austin. Pertenece al Instituto Max Planck de Astrofísica de Garching. Ha trabajado en el diseño de modelos de discos de acreción formados en estrellas variables cataclísmicas y alrededor de agujeros negros de masa ingente. Kaitchuck, que obtuvo el doctorado en astronomía en 1981 en la Universidad de Indiana, es profesor del departamento de física y astronomía en la Universidad Ball en Muncie; se ha especializado en resolución espectroscópica de estrellas binarias.

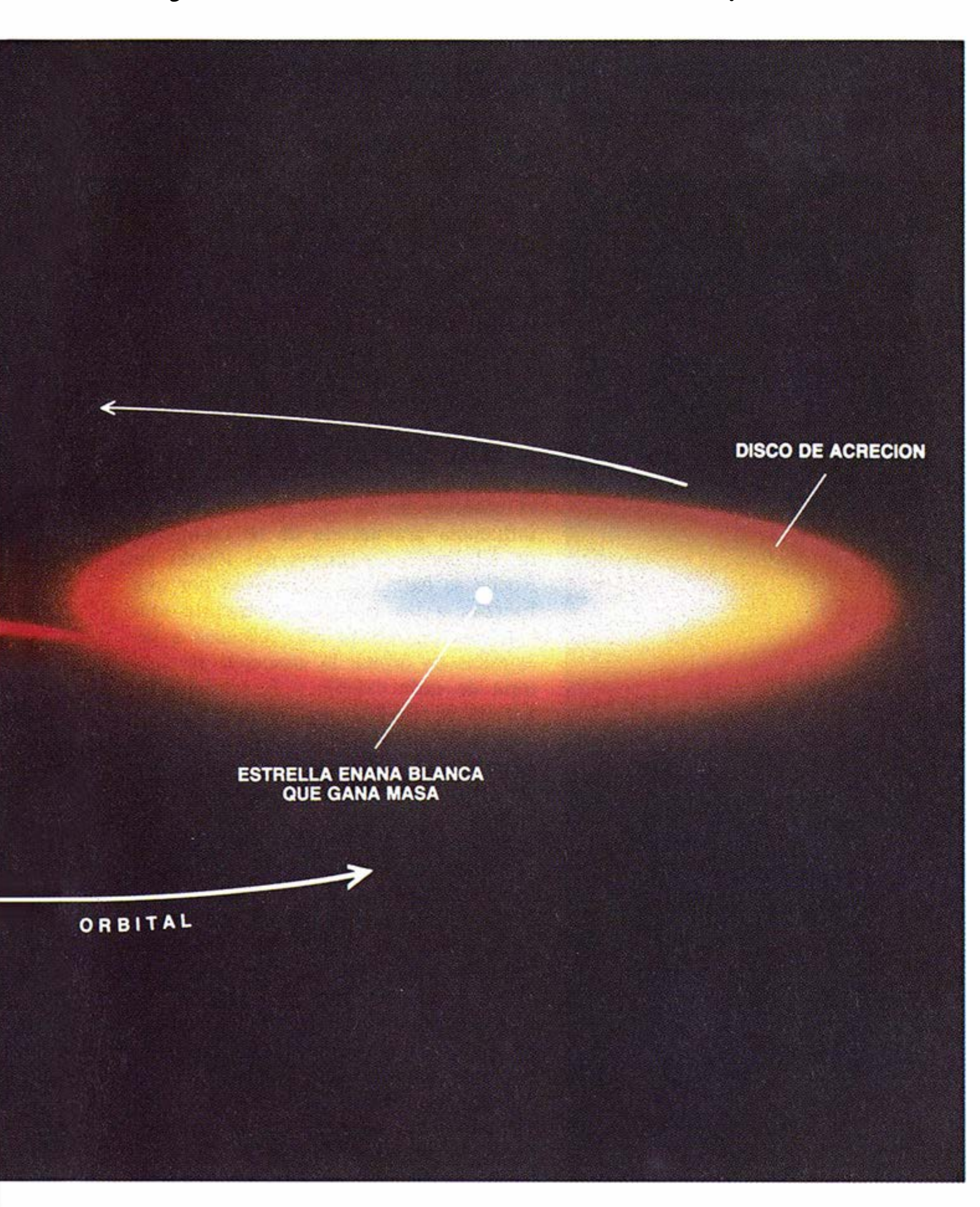


1. SISTEMA DE ESTRELLA BINARIA EN INTERACCION. Consta de una estrella enana blanca, caliente y densa, y su compañera, más fría y de menos masa. El brillo del sistema se multiplica hasta por 100 de forma cuasiperiódica. La acción de la gravedad ejercida por la enana blanca deforma la estrella roja, que adopta el aspecto de una lágrima y expulsa un chorro de gas a través

las leyes fundamentales de la física favorecen esas estructuras. Consideremos, por ejemplo, una nube irregular y constituida por partículas que se mueven en órbitas aleatorias; concedamos, además, que el conjunto posee un momento cinético neto, y, si la nube es de gas, séanos permitido llamar "partícula" a una porción pequeña del volumen de la misma.

Cada partícula de la nube responde a la atracción gravitatoria de las porciones restantes. Las partículas que pasan muy cerca una de otra experimentan fuerzas de presión y gravitatorias que desvían sus trayectorias respecto a la del movimiento orbital puro. Tales interacciones entre partículas disipan la energía de los movimientos aleatorios, mientras que la conservación del momento cinético preserva la energía de rotación de la nube. Con el tiempo, las partículas se acomodarán en la configuración de más baja energía: órbitas circulares que descansan todas en el mismo plano.

Se han ideado varios modelos que permitan comprender el comportamiento de tales discos de acreción. Las hipótesis más sencillas dan por supuesto que la aportación de masa al disco compensa exactamente la acreción sobre el objeto central. La mayoría de los modelos de disco de acreción estáticos se basan en un trabajo pionero de 1973 realizado por Nikolai I. Shakura, del Instituto Astronómico Sternberg, y Rashid A. Sunyaev, entonces en el Instituto de Matemáticas Aplicadas; los dos centros se hallan en Moscú.



del vértice. Debido a su movimiento orbital el chorro se arrastra detrás de la enana blanca. La viscosidad provoca que el chorro se extienda en disco; el gas del disco se precipita hacia el interior para terminar cayendo sobre la enana blanca. En ese proceso, el gas se calienta y despide un brillo intenso. Las variaciones del flujo de gas en el disco producen bruscas fluctuaciones de luminosidad.

Por razón de sencillez, Shakura y Sunyaev describían el disco como una estructura fina, plana y gaseosa, cuyo campo gravitatorio resulta despreciable comparado con el del objeto central. El gas, por tanto, obedece las leyes del movimiento de Kepler, lo que significa que la velocidad orbital de cada partícula del gas es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de su distancia al objeto central.

Las partes interiores del disco giran más deprisa que las exteriores, lo que significa que se deslizan con respecto a éstas. El rozamiento entre la materia de radios adyacentes —su viscosidad— calienta el gas y transporta momento cinético orbital hacia fuera. El gas calentado emite radiación electromagnética, que escapa del sistema. En el proceso, la energía potencial gravitatoria se convierte en energía radiante. En virtud de ello, el gas deriva poco a poco hacia dentro, a una diezmilésima de su velocidad orbital, aproximadamente.

La intensidad del acoplamiento entre radios adyacentes en el disco, que determina la velocidad de importación de masa, está controlada por el valor de la viscosidad del gas. Por desgracia, no hay ninguna teoría fiable que prediga el valor de esa viscosidad; Shakura y Sunyaev supusieron que la viscosidad era proporcional a la presión en el disco. En las ecuaciones que describen el estado físico del disco, el valor de la viscosidad aparece como un parámetro ajustable, llamado alfa. Toda la física desconocida relativa a la viscosidad está escondida en alfa. Fijar el valor de alfa permite construir modelos que predigan las condiciones físicas. Para nuestra fortuna, el espectro de radiación emitido por un disco en régimen estacionario es independiente de alfa.

La naturaleza del objeto central determina la profundidad del pozo de potencial gravitatorio, que a su vez determina el flujo de energía procedente del disco. Cuando el objeto central es una estrella ordinaria, el disco radia principalmente en el visible y en el infrarrojo. La materia en órbita alrededor de una enana blanca o una estrella de neutrones (es decir, de una estrella colapsada), cae a lo largo de una distancia mucho mayor antes de incidir sobre la superficie de la estrella. Los discos que ciñen esos objetos liberan más energía total; el máximo de emisión se produce en longitudes de onda del ultravioleta o rayos X.

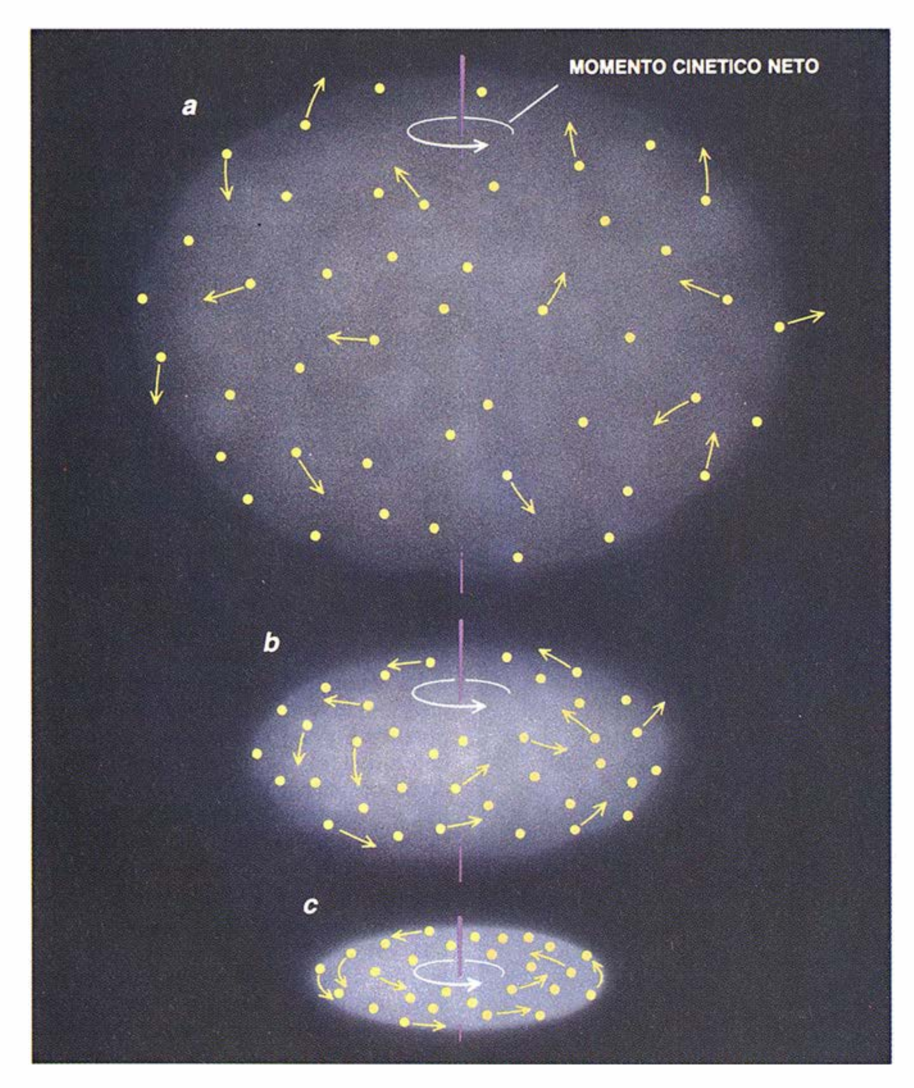
Debido a las grandes distancias a

considerar, resulta imposible observar directamente los discos de acreción, ni siquiera de las estrellas binarias más cercanas. Los astrónomos se han visto obligados a inferir la estructura de los sistemas estelares analizando la radiación que producen. La luz emitida por el lado del disco que se mueve hacia el observador experimenta un corrimiento hacia el extremo azul del espectro, mientras que la luz procedente de las porciones que se alejan se corre hacia el rojo: efecto de corrimiento Doppler. El agitado gas de un disco de acreción produce, por tanto, una signatura espectral distintiva.

Así fue como Arthur Wyse, del observatorio Lick, detectó en 1934 el primer disco de acreción conocido en un sistema de estrellas dobles. Se hallaba estudiando el espectro de RW de Tauro, una binaria que consta de una estrella caliente de la secuencia principal y una compañera grande, roja y fría. El plano orbital de las dos estrellas aparece casi de canto, por lo que una vez en cada órbita la estrella fría tapa a su compañera. Wyse obtuvo un espectro de la estrella roja durante el intervalo de 90 minutos en que la compañera quedaba completamente oculta a la vista. Observó líneas de emisión corridas por efecto Doppler; este dato denunciaba la presencia de un gas caliente, que se movía muy deprisa.

A principios del cuarto decenio de nuestro siglo, Alfred H. Joy, del observatorio del Monte Wilson, obtuvo espectros adicionales de RW Tauri. Descubrió que, al comienzo de un eclipse, las líneas de emisión se corrían hacia el rojo; al final de un eclipse, ese efecto Doppler de las líneas se producía hacia el azul en igual cuantía. Joy dedujo que la estrella caliente estaba rodeada por un anillo de gas en rápida rotación. Al comienzo de un eclipse, el lado del anillo que se aleja del observador permanece visible más allá del borde de la estrella fría, generando líneas de emisión corridas hacia el rojo. Cuando el eclipse se acerca a su fin, el lado que gira hacia el observador es visible y genera líneas corridas hacia el azul.

En los años subsiguientes, los astrónomos llegaron a sospechar que el anillo gaseoso de Joy bien podría ser un disco cuyo borde interior descansaba sobre la superficie de la estrella central. En el decenio de los cuarenta, Otto Struve, del observatorio McDonald, y algunos más lanzaron la idea de que la materia fluía desde la estrella compañera hacia el disco, para depositarse después sobre la estrella central. Hoy se ha convertido en una opinión compartida por la mayoría de los astrónomos.



2. FORMACION NATURAL DE DISCOS en sistemas irregulares que poseen momento cinético neto (*a*). Las interacciones entre partículas del sistema anulan los movimientos aleatorios (*b*), creando en último término un disco plano y circular en rotación (*c*). Obligadas por la viscosidad, las partículas describen espirales hacia dentro y se acumulan sobre las regiones centrales del disco.

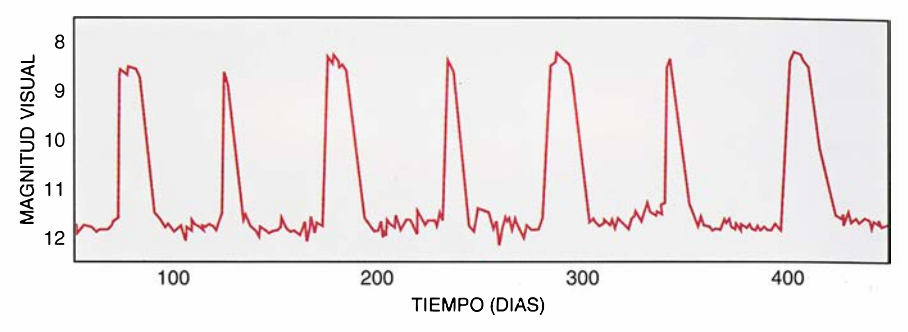
En las estrellas binarias, el flujo de materia constituye a veces un resultado directo de la evolución estelar. La estrella llega al final de su vida estable con su núcleo exhausto en hidrógeno combustible, y comienza a contraerse; conforme el núcleo se va apretando, también se calienta y libera más energía, provocando la dilatación de la región externa de la estrella. Si una estrella en un sistema binario estrechamente ligado se dilata más allá de cierto volumen, llamado lóbulo de Roche, la materia que se mueve hacia el exterior de la estrella cae bajo la influencia gravitatoria de su compañera. El tamaño y forma del lóbulo de Roche se hallan condicionados por tres fuerzas a las que está sometida una partícula en reposo con respecto a las estrellas en órbita: la atracción gravitatoria de cada estrella y la fuerza centrífuga producida por el movimiento orbital de cada partícula. Esas fuerzas antagónicas confieren a la superficie del lóbulo de Roche la forma de una lágrima.

Si la estrella se dilata más allá de esta superficie, el gas sigue el camino de la mínima energía, en dirección hacia la estrella compañera. El gas emerge a través del vértice de la lágrima, llamado punto interior de Lagrange (L1), donde se hace máxima la influencia gravitatoria de la compañera. El gas que sale del punto L1 crea una corriente angosta que avanza hacia la estrella compañera. Como el gas todavía transporta momento lineal del movimiento orbital de la estrella que acaba de abandonar, no cae directamente sobre la compañera, sino que la corriente da un rodeo hasta la parte posterior de la estrella, cuya masa está creciendo.

Los sucesos que se producen a continuación dependen del tamaño de la estrella engrosante comparado con la separación orbital de ambas estrellas. Si la primera es pequeña, la corriente de gas se curva en torno a ella y desarrolla un anillo, que no tardará en pasar a ser disco plano en virtud de la viscosidad; ésta provoca que parte del gas pierda momento cinético y describa espirales hacia dentro, mientras que un volumen menor del gas gana el momento cinético perdido y describe espirales hacia fuera.

Si la estrella en acreción posee cierta talla, la corriente gaseosa chocará con el cuerpo de la estrella en crecimiento. Y por inexplicable que nos parezca, acabará formándose otro objeto similar a un disco de acreción; se trata, sin embargo, de un disco turbulento e inestable, que desaparece de inmediato si cesa la aportación de masa, a imitación del chorro de una manguera de jardín cuando cerramos el grifo. La RW de Tauro resulta ser una estrella binaria de disco transitorio.

Los discos de acreción exhiben un comportamiento más complejo y violento en las variables cataclísmicas. Estos sistemas de estrellas binarias cuentan con una compañera, densa y caliente, que acumula materia procedente de su compañera, más fría. La cesión de masa está aquí impulsada por una pérdida de momento cinético orbital que lentamente va acortando la separación entre las estrellas y provoca la contracción del lóbulo de Roche en torno a la estrella roja. No parece que gocen de estabilidad los discos de las variables cataclísmicas. La posibilidad de que el flujo de materia a través de esos discos no sea constante constituye todo un reto el idear una explicación de las variables cataclísmicas. Pero vale la pena recoger el guante: el comportamiento errático de esos objetos encierra importantes pistas sobre la naturaleza general de los discos de acreción.



3. EL BRILLO DE LA ESTRELLA SS DEL CISNE varía en un factor de 20. Las fulguraciones casi regulares reflejan, con toda probabilidad, cambios en la velocidad de flujo de la masa procedente del disco de acreción. La estrella SS del Cisne ofrece una amplia gama de comportamientos, visto a largo plazo; en uno de los modos más comunes, representado aquí, alterna entre fulguraciones de larga y de corta duración. Los datos se publican por cortesía de la Asociación Americana de Observadores de Estrellas Variables.

Como su nombre implica, algunas variables cataclísmicas experimentan fuertes explosiones, durante las cuales se centuplica bruscamente su brillo en cuestión de días o incluso de horas. Las novas enanas, subgrupo de variables cataclísmicas, destellan de manera cuasiperiódica. Las erupciones de las novas enanas se repiten en intervalos de semanas a años; cada episodio dura de días a semanas. Esas enanas difieren de las novas ordinarias, alimentadas, se supone, por la fusión nuclear del hidrógeno depositado por acreción sobre la superficie de una estrella enana blanca. Las explosiones de las novas enanas parecen depender sólo de la energía gravitatoria, lo que explica por qué son 1000 veces menos intensas que las novas ordinarias.

El trabajo pionero de Robert P. Kraft, del observatorio del Monte Wilson, en los años sesenta, reveló que las variables cataclísmicas eran estrellas binarias cuyas componentes describen órbitas muy próximas entre sí. Una binaria cataclísmica típica tiene un período orbital de cuatro horas, y las hay con un período inferior a los 90 minutos. Orbitas tan rápidas denuncian una mínima separación entre las estrellas y, por ende, las propias estrellas serán pequeñísimas. La verdad es que el sistema cataclísmico cabría dentro del Sol.

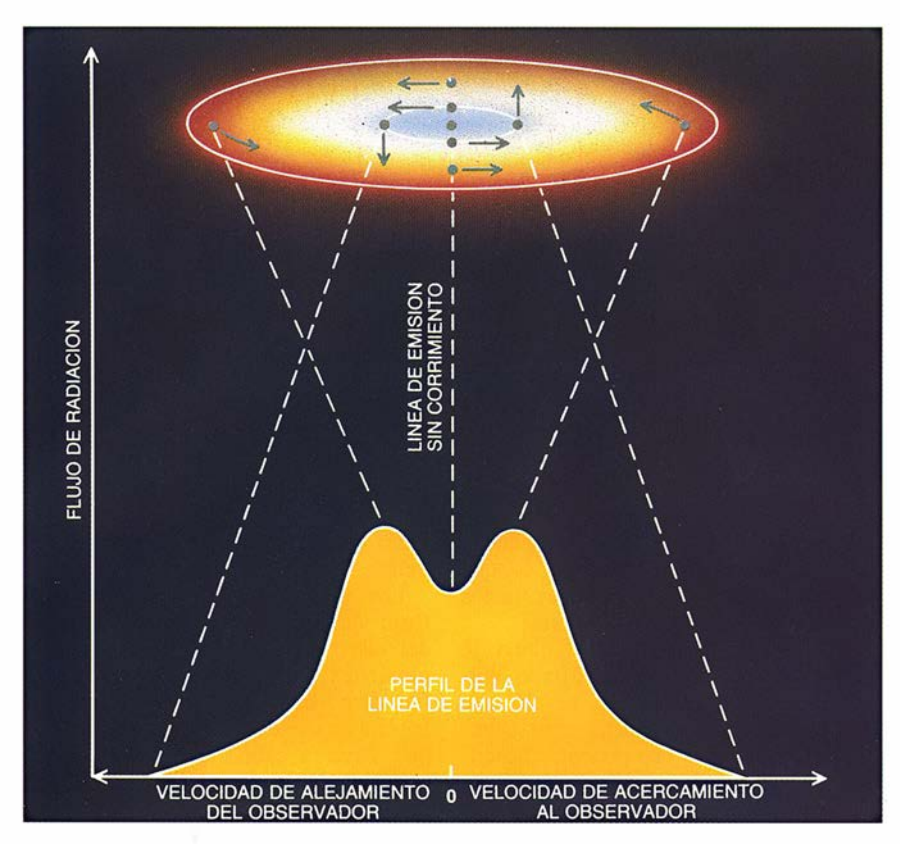
El examen de los espectros luminosos y de los flujos de radiación en un amplio dominio de longitudes de onda revelan la existencia de tres componentes principales en toda binaria cataclísmica: una estrella enana roja, una enana blanca y un disco de acreción que rodea a la enana blanca. La enana roja es una estrella fría, débil y de poca masa, que está perdiendo materia a través de su punto L1. La enana blanca es mucho más caliente, más luminosa y de mayor masa. Las enanas blancas constituyen el resto de los núcleos de estrellas antiguas que han agotado su combustible de hidrógeno. A falta de una fuente de energía interna, el núcleo adquiere una densidad descomunal: se hace unos 10 millones de veces más denso que el agua. Las enanas blancas tienen aproximadamente la masa del Sol en sólo el tamaño de la Tierra.

Por gozar de tal densidad, la enana blanca posee un pozo gravitatorio excepcionalmente profundo. La materia que cae sobre ella desde el disco de acreción libera una gran cantidad de energía potencial gravitatoria por medio del calentamiento viscoso del disco. Tan intenso es el calentamiento, que el disco se hace más brillante que las estrellas.

Los astrónomos han deducido que el flujo de masa intensificado a través del disco de acreción alimenta las explosiones de las novas enanas. Esto fue demostrado por Brian Warner, de la Universidad de Ciudad del Cabo, que llevó a cabo observaciones fotométricas de la nova enana Z del Camaleón. Vista desde la Tierra, la estrella roja de esta binaria eclipsa a la enana blanca y al disco de acreción que la rodea una vez cada órbita. Durante una explosión, la pérdida de luz en mitad del eclipse es mucho mayor que durante las épocas tranquilas, señal de que la fuente de la explosión no puede ser la estrella enana roja. Además, la duración de los eclipses sucesivos se alarga con el progreso de la explosión, lo que implica que la erupción se está extendiendo por toda la cara del disco.

El espectro óptico de una nova enana cambia espectacularmente durante el curso de una explosión. El espectro en períodos tranquilos muestra un fondo azul, superpuestas al cual hay líneas de radiación emitida por el hidrógeno y el helio simplemente ionizado (helio privado de un electrón). El fondo se origina en las densas regiones interiores del disco; las líneas de emisión se producen en las regiones exteriores, más enrarecidas. En los sistemas en los que el plano orbital se ve casi de canto, los perfiles de emisión describen curvas con doble máximo. La razón de la presencia de esos picos reside en las dos componentes sometidas a corrimiento Doppler de que consta cada cada perfil: una del lado del disco que en su giro se acerca al observador, y la otra del que se aleja.

Durante una explosión, la radiación del fondo continuo aumenta bruscamente de brillo y se hace más difícil,



4. APARECEN LINEAS DE EMISION CON DOBLE MAXIMO cuando los discos de acreción nos miran casi de canto. La emisión de radiación se produce a una sola longitud de onda. Las partes del disco que avanzan hacia el observador tienen su longitud de onda corrida hacia el azul; las partes que se alejan, se corren hacia el rojo. Las regiones más internas del disco se mueven más deprisa y emiten, por ende, la luz con los mayores corrimientos. Debido a su escasa área superficial, la parte interna del disco aporta la menor cantidad de luz. El gas que procede a lo largo de la visual no sufre corrimiento.

si no imposible, percibir las líneas de emisión. Aparecen con frecuencia anchas líneas de absorción del hidrógeno, resultado de la radiación que es absorbida por el gas más frío que rodea la parte brillante del disco. Cuando el brillo de la explosión se va amortiguando, el fondo continuo se debilita y las líneas de emisión adquieren la nitidez característica.

Las explosiones de las novas enanas se deben, así parece, a una intensificación repentina del flujo de masa a través del disco de acreción hasta la estrella enana blanca. Ese aflujo mayor podría resultar de una oleada procedente de la estrella roja que pierde masa o de un cambio en el propio disco de acreción. La primera posibilidad, propuesta hace 20 años por Geoffrey T. Bath en la Universidad de Oxford, requiere que la estrella roja periódicamente se salga de su lóbulo de Roche y vierta su materia sobrante en el disco de acreción. La materia adicional acelera la velocidad de acreción, lo que a su vez intensifica la luminosidad del disco.

Unos años más tarde, Jozef Smak, del Centro Copérnico de Astronomía en Varsovia, y Yoji Osaki, de la Universidad de Tokio, presentaron una solución rival, aunque lo hicieron de manera independiente. La hipótesis de Smak-Osaki supone que la masa fluye de la estrella secundaria a una velocidad constante. La materia se almacenaría en el propio disco de acreción, para verterla después sobre la enana blanca cada vez que la masa del disco supera un nivel crítico.

La mayoría de los astrofísicos acepta el modelo de inestabilidad del disco que se funda en el trabajo de Smak-Osaki. Y existe ampliamente compartida la idea según la cual la inestabilidad se desencadena cuando en alguna parte del disco se alcanza una densidad superficial crítica. Llegada a su valor crítico la densidad de una región local, la viscosidad se multiplica enormemente y la materia almacenada se arroja sobre la enana blanca, produciendo la explosión. Cuando la densidad superficial desciende por debajo de cierto valor, la viscosidad cae y comienza de nuevo el proceso de acumulación.

Durante años, los teóricos han trabajado para crear modelos matemáticos capaces de describir la inestabilidad en los discos de acreción, hipótesis que predicen la densidad superficial local y la temperatura cuando se especifican los valores de la tasa de acreción y de alfa para cierto radio. Un aumento de la tasa de acreción conduce a una mayor densidad superficial, y, ésta, a un aumento del calentamiento viscoso. Es de esperar, por tanto, que la temperatura del disco varíe en proporción a la densidad superficial; la gráfica de la temperatura local en función de la densidad superficial para un radio dado en un disco de acreción debe dar una curva creciente.

Los modelos de explosión de Osaki y Smak requerían que, para una posición dada en el disco, existieran dos posibles valores estables de la temperatura manteniendo el mismo valor de la densidad superficial. La explosión corresponde a la solución de temperatura más alta; el estado quiescente, a la solución de baja temperatura. En este caso, la curva en los ejes temperatura-densidad superficial será una curva sigmoidea. Osaki y Smak aceptaron implícitamente que tal configuración en S admitía una explicación física, pero no aportaron ningún mecanismo plausible.

En 1979, Reiun Hoshi, de la Universidad Rikkyo de Tokio, demostró la existencia de tal mecanismo. Hoshi trabajó con un modelo centrado en la estructura vertical del disco de acreción (las condiciones físicas dominantes en una delgada rebanada cortada perpendicularmente al disco). A pesar de la tosquedad de su modelo de estructura vertical, halló una relación de la que se originaba la curva sigmoidea; así ocurría de manera natural cuando su modelo explicaba la temperatura a la que el hidrógeno se ioniza parcialmente, esto es, cuando el disco se ha calentado tanto que parte de los átomos de hidrógeno pierden los electrones envolventes.

Para conocer cómo opera la relación de curva sigmoidea, hemos de examinar las condiciones físicas en un disco estable (del que se dice que se halla en estado de equilibrio térmico). En un sistema cuya temperatura permanece constante, la energía que escapa al espacio debe quedar compensada por la que se libera del interior; si no aconteciera así, el sistema se enfriaría o se calentaría. Además, para ser verdaderamente estable, la temperatura del sistema debe volver a su valor inicial, a pesar de las pequeñas perturbaciones.

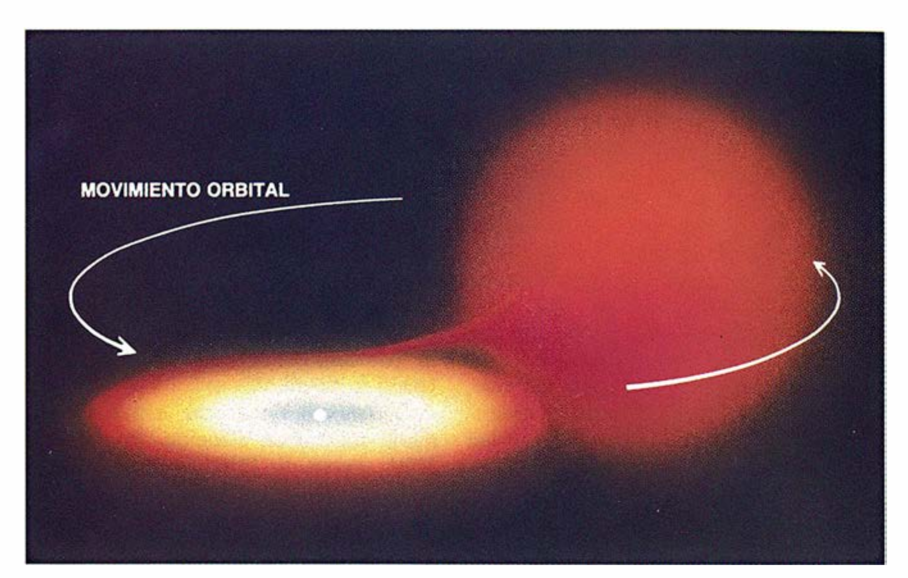
El Sol, por ejemplo, se halla en estado de equilibrio térmico. Si la temperatura central del astro descendiera

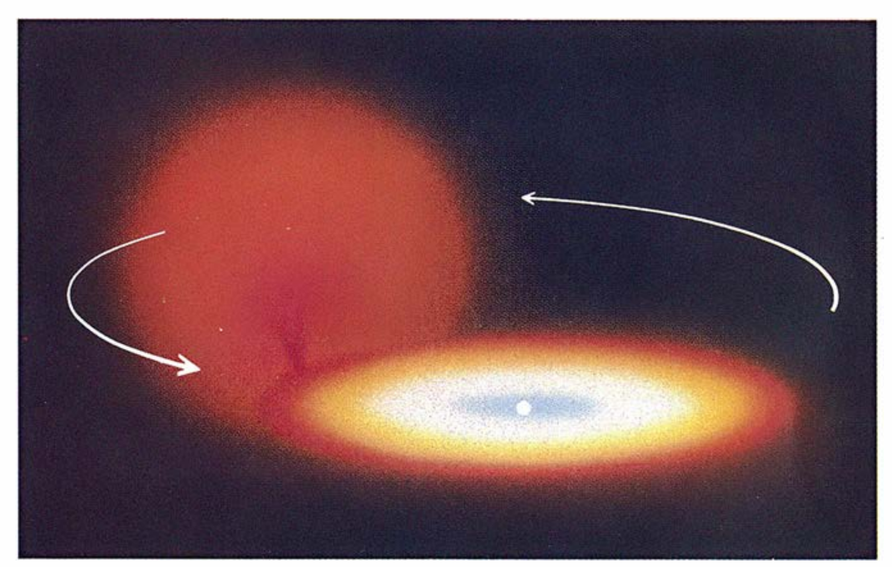
ligeramente, la presión del gas disminuiría y el Sol se contraería, contracción que elevaría la temperatura central y avivaría el ritmo de las reacciones nucleares; esto provocaría la dilatación del cuerpo hasta su tamaño inicial. A fin de cuentas, el Sol retornaría a su temperatura y emisión de energía originales.

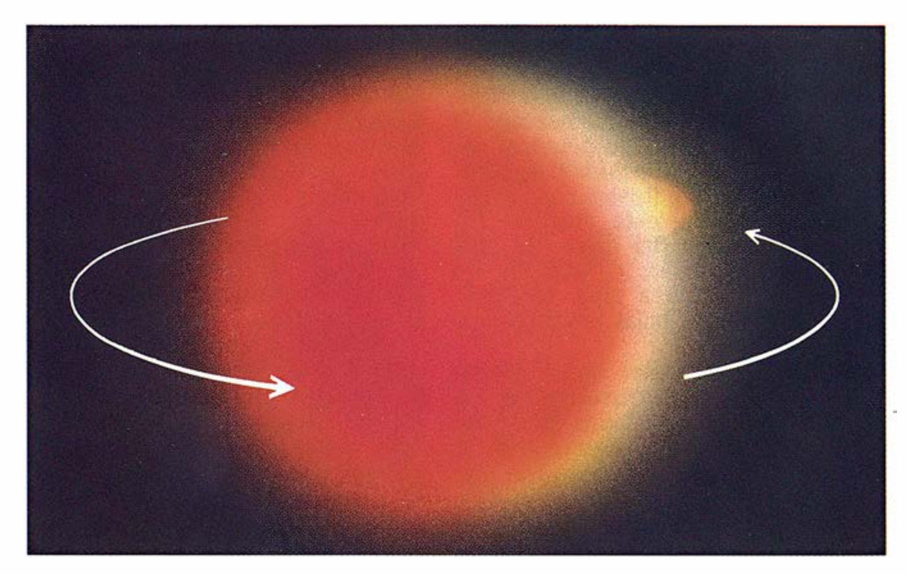
La situación en un disco de acreción viene a ser semejante. Si la temperatura en el plano intermedio disminuyera ligeramente durante un corto intervalo de tiempo, la viscosidad local disminuiría en virtud de la menor interacción por rozamiento. La densidad superficial aumentaría entonces: la disminución de la viscosidad retardaría el flujo de masa hacia el interior, mientras que la materia de las zonas exteriores continuaría cayendo, a un ritmo constante, sobre la región. El aumento de la densidad superficial daría por resultado un mayor calentamiento viscoso, lo que haría retornar la temperatura y la densidad superficial a sus valores iniciales. Bajo esas condiciones, la representación de la temperatura en función de la densidad superficial dibuja la pendiente creciente que era de esperar, puesto que las regiones de temperaturas altas requieren altas densidades superficiales a fin de proporcionar suficiente calentamiento viscoso.

El mecanismo anterior puede mantener el equilibrio térmico del disco, siempre que la opacidad no varíe sustancialmente al cambiar la temperatura. La opacidad del gas determina hasta qué punto la energía del disco puede escapar libremente al espacio; una alteración sustancial de la opacidad controla de manera decisiva la temperatura del disco. A una temperatura de unos 10.000 kelvins, los átomos de hidrógeno comienzan a perder sus electrones (se ionizan parcialmente) y la opacidad del hidrógeno cambia de repente para crecer con la décima potencia de la temperatura, aproximadamente.

En regiones del disco próximas a la temperatura crítica, un ligero enfriamiento conduce a una caída brusca de la opacidad, dejando que escape más energía al espacio y fomentando un mayor descenso de la temperatura. A la inversa, un pequeño descenso de la temperatura intensifica la opacidad, entorpeciendo el flujo de radiación y produciendo un ulterior calentamiento. Las regiones críticas del disco se enfriarán o se calentarán hasta que alcancen las ramas estables de la parte superior o inferior de la curva en S. El comportamiento térmico inestable corresponde a la parte intermedia, de







5. LOS SISTEMAS DE NOVA ENANA VISTOS DE CANTO experimentan eclipses regulares que ayudan a revelar la disposición del sistema. Durante una fulguración, el brillo máximo de la estrella se eleva notablemente. Por contra, mientras el disco de acreción está eclipsado, el sistema se debilita mucho más de lo que lo hace en las épocas quiescentes. Ese fenómeno demuestra que la luz adicional precedente proviene del disco y no de la estrella enana roja.

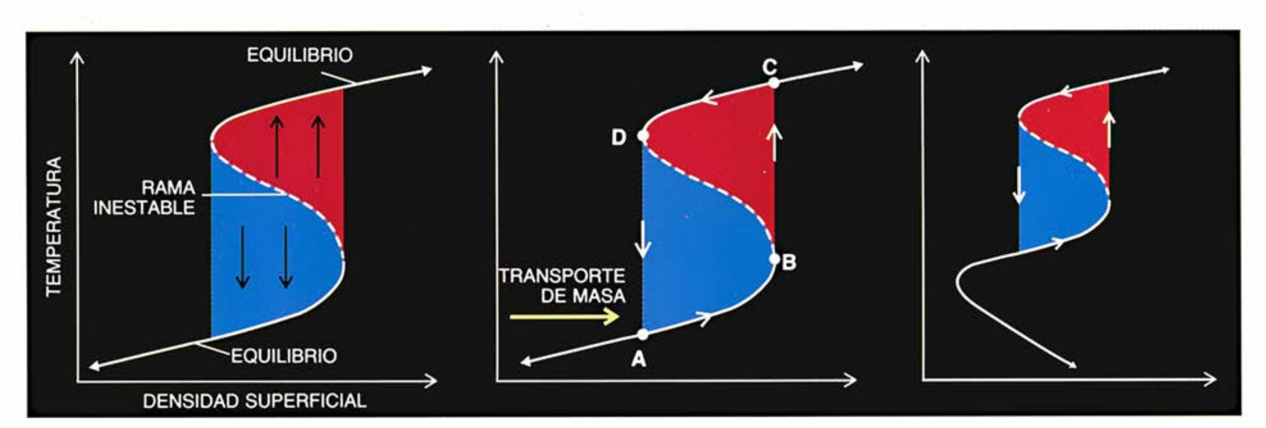
pendiente negativa, de la curva sigmoidea.

El flujo vertical de energía que sale del disco depende de la opacidad local y de la densidad superficial local (que es proporcional a la cantidad de gas a lo largo de la visual). La rama inferior de la curva en S es térmicamente estable porque a bajas temperaturas hay muy poco hidrógeno ionizado, y así la opacidad sólo varía débilmente con la temperatura. De manera análoga, la rama superior es estable porque el disco está tan caliente, que el hidrógeno se halla completamente ionizado; en este estado, la opacidad vuelve a variar poco aunque varíe la temperatura. Por contra, en la región intermedia que las une, la extremada sensibilidad de la opacidad a las variaciones de temperatura conduce a condiciones de inestabilidad térmica. Empleando estos razonamientos físicos, Hoshi demostró que una zona de hidrógeno parcialmente ionizado en el disco de acreción se hallaría facultada para producir las soluciones de doble valor de la temperatura suministradoras del mecanismo físico subyacente bajo la inestabilidad del disco propuesta por Osaki y Smak.

El trabajo de Hoshi, sin embargo, atrajo muy poca atención. En julio de 1981, James E. Pringle, de la Universidad de Cambridge, dictó una lección magistral en un simposio celebrado en la Universidad de California en Santa Cruz; expuso, con trazos muy generales, de qué modo una curva sigmoidea de la relación temperatura-densidad podría proporcionar las condiciones que conducirían a erupciones de nova enana. Entre los asistentes había varios que trabajaban en la creación de modelos de discos de acreción; se dieron inmediata cuenta de la importancia del cálculo detallado de la estructura vertical del disco.

Cinco meses más tarde, Friedrich Meyer y su esposa, Emmi Meyer-Hofmeister, ambos del Instituto Max

Ciclo de las novas enanas



Según predice uno de los modelos más sólidos ideados para explicar las erupciones de nova enana, el disco de acreción en torno a la estrella experimenta episodios de inestabilidad cuasiperiódica. Las figuras de arriba que representan la variación de la temperatura en función de la densidad superficial del disco ilustran la forma de operar de este modelo. En cada posición del disco hay dos ramas estables, o estados de equilibrio, una a altas temperaturas y otra a bajas temperaturas (*izquierda*).

Una región del disco donde las condiciones corresponden al área en rojo se calienta de forma progresiva y se estabiliza en el estado de alta temperatura. Las regiones correspondientes al área azul se enfrían hasta llegar al estado de baja temperatura. La rama superior corresponde a una explosión; la inferior, al estado quiescente.

El disco de acreción en torno a la enana blanca, en un sistema de nova enana, oscila entre las dos ramas. Veamos cómo. Considérese una región circular, o anillo, a distancia fija de la enana blanca, en la que la temperatura y la densidad superficial vienen representadas por el punto A (*centro*). La flecha horizontal muestra el ritmo de deposición, sobre el disco, de materia procedente de la enana roja o estrella secundaria. La materia llega al anillo a un ritmo mayor que la tasa de deposición sobre la enana blanca; por consiguiente, aumentan la densidad superficial y la temperatura.

Cuando el anillo alcanza un estado correspondiente al punto B, cae fuera del equilibrio térmico. El calentamiento viscoso supera ahora las pérdidas de energía por radiación; y así, la región se calienta deprisa hasta que alcanza la rama superior, térmicamente estable, en el punto C. Sometido el disco a temperaturas tan elevadas, la viscosidad resulta ser muy grande, por lo que la materia acumulada se desparramará deprisa hacia dentro y caerá sobre la enana blanca.

Con el súbito empobrecimiento en materia, disminuye la densidad superficial local del disco y baja su temperatura: la región pasa, entonces, del punto C al punto D. En éste entra de nuevo en juego la inestabilidad térmica. Las pérdidas por radiación superan ahora al calentamiento viscoso, y la temperatura cae. Tras un período de enfriamiento, el anillo termina de nuevo en el punto A. El ciclo vuelve a comenzar.

El modelo descrito atribuye un valor arbitrario a la viscosidad en el disco. Cannizzo y A. G. W. Cameron, de la Universidad de Harvard, han desarrollado un modelo más completo, desde una perspectiva física. Se supone en él que el calentamiento viscoso resulta de la turbulencia que acompaña a los movimientos convectivos en el disco de acreción. En este caso, la relación en forma de S entre temperatura y densidad superficial explicada arriba constituiría una parte de una curva más general, en W (*derech*).

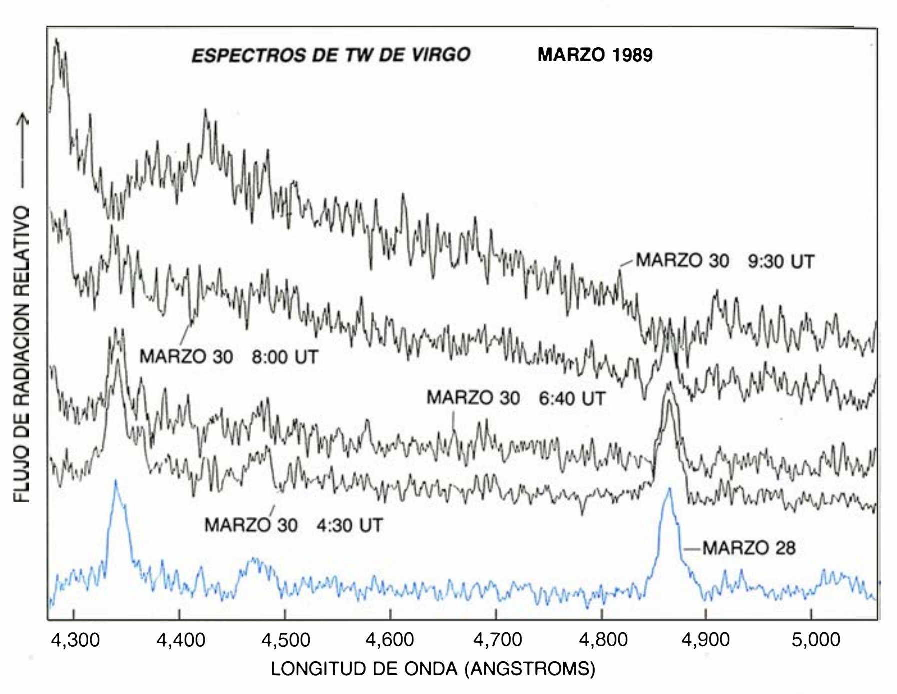
Planck de Astrofísica en Garching, publicaron un breve artículo que aportaba base física a la idea de Pringle. Aparecieron al poco varios artículos sobre la inestabilidad en los discos: de Smak en Polonia; Pranab Gosh, J. Craig Wheeler y uno de los autores (Cannizzo), entonces todos en la Universidad de Texas en Austin; Douglas N. C. Lin y John Faulkner, de la Universidad de California en Santa Cruz, y John C. B. Papaloizou, del Colegio Reina María; y Shin Mineshige (ahora en la Universidad Ibaraki) y Osaki.

Todos sabíamos que las erupciones de nova enana eran consecuencia de la inestabilidad del disco de acreción. Las condiciones en cada radio del disco se corresponden con puntos de la curva sigmoidea de la temperatura-densidad superficial. La temperatura o, lo que es lo mismo, la tasa de acreción para un radio dado, está determinada por la densidad superficial y por la historia de la evolución de la materia allí. Cuando las condiciones locales varían hasta la región inestable de la curva en S, el disco cambia de un estado quiescente a una explosión o viceversa.

El modelo de inestabilidad del disco aventura predicciones que pueden someterse a prueba con observaciones de novas enanas. Smak perfiló varias predicciones de ésas en un artículo clave que apareció en 1984. Otros de los mencionados arriba publicaron estudios semejantes por el mismo tiempo. Empleando modelos informáticos para simular el comportamiento en función del tiempo de un disco de acreción, Smak creó curvas de luz artificiales que se asemejan mucho a las observadas.

Hay varios aspectos de las erupciones de novas enanas que parecen concordar muy bien con el modelo de inestabilidad del disco. Las curvas de luz producidas por las inestabilidades de disco pueden mostrar un lento o un rápido aumento del brillo. Los modelos informáticos sugieren que las inestabilidades que se inician cerca del borde exterior del disco producen los aumentos rápidos. En este caso, el radio del disco debe aumentar durante la explosión, fenómeno que se ha observado en varias novas enanas.

En tales erupciones "centrípetas", la emisión ultravioleta debería aumentar tras hacerlo la luz visible, porque los rayos ultravioleta de alta energía provienen de las regiones interiores y calientes del disco, que deben ser las últimas afectadas por la erupción. De las observaciones realizadas por el satélite *Explorador Internacional en el Ultravioleta* (*IUE*) se desprende que, en varias novas enanas, la erupción aparece en el ultravioleta un día después de observarse en el visible. Pero Pringle,



6. CAMBIO ESPECTACULAR DEL ESPECTRO DE UNA NOVA ENANA al comienzo de una explosión; lo recogemos para el caso de la estrella doble TW de Virgo. El espectro de la parte inferior muestra la estrella en estado quiescente. Los otros espectros documentan los cambios que se produjeron noches más tarde. Durante aproximadamente dos noches, el sistema se hallaba en fase de pre-explosión y aumentó de brillo sólo ligeramente. La estrella intensificó luego, de repente, su luminosidad, especialmente a las longitudes de onda más azules. Para el día siguiente, el brillo de TW de Virgo se había multiplicado por 100.

Frank Verbunt y Richard A. Wade, que entonces trabajaban en Cambridge, mostraron en 1986 que este comportamiento admitía otra explicación igualmente plausible en el marco del modelo de inestabilidad secundaria de Bath.

El modelo de inestabilidad del disco formula otra predicción importante: cuando la tasa de transporte de masa desde la enana roja supera cierto nivel crítico, el flujo de materia hacia dentro debe producirse a ritmo constante, muy elevado, correspondiendo a la rama superior estable de la curva sigmoidea. Warner y Smak examinaron, cada uno por su cuenta, la cuestión y dedujeron las tasas de transporte de masa de un elevado número de binarias en interacción. Hallaron que los sistemas en los que el intercambio de masa es muy alto, no muestran erupociones; sí lo hacen los sistemas en que está por debajo de un cierto valor. Su línea divisoria observada concuerda bien con el valor teóricamente esperado, magnitud que es independiente del desconocido parámetro alfa. No hay razón para esperar tal límite superior del modelo de Bath. La observación de la evolución espectral de una fulguración de nova enana podría proporcionar importantes restricciones experimentales para los modelos de inestabilidad de disco. La intensidad de la radiación de las regiones que producen líneas de emisión puede ser sensible a pequeñas variaciones de las condiciones físicas locales. Los cambios en la intensidad de las líneas de emisión podrían, pues, anunciar la proximidad de una erupción.

Tal efecto fue observado por Cathy S. Mansperger y Panayiotis Hantzios, de la Universidad estatal de Ohio, y uno de los autores (Kaitchuck) en las líneas de emisión de la estrella RX de Andrómeda, 18 horas antes del comienzo de una explosión. El sistema parece incrementar su brillo en varios puntos de porcentaje durante las 24 horas anteriores a la explosión principal. Estas observaciones y otras corroboran la existencia, en ciertos casos, de una fase previa a la explosión en el ciclo de las novas enanas.

Mansperger y Kaitchuck consiguieron observar la transición de la fase previa a la explosión en la nova enana TW de Virgo. Cierto anochecer, el sistema de estrellas brillaba más que de ordinario. Durante las siguientes dos horas y media, el brillo del sistema aumentó sólo ligeramente. Después, en 15 minutos, la pendiente del espectro de la radiación de fondo aumentó bruscamente: era la señal de que la temperatura del disco había comenzado a subir de forma drástica. Al propio tiempo se aceleró la intensificación del brillo. A lo largo del resto de la noche, la pendiente del fondo aumentó

todavía más y las líneas de emisión espectrales se sustituyeron por líneas de absorción, lo que indicaba que la mayor parte del disco se había vuelto más caliente que el Sol. Cuando la aurora puso fin a las observaciones, el brillo del sistema se había multiplicado por 12. Al día siguiente, había subido a 100 veces el valor previo a la erupción.

Ese comportamiento observado en la fase previa habíase predicho, en buen trecho, por un modelo de disco que Mineshige elaboró en el Instituto de Astronomía de Cambridge. En el modelo en cuestión, a la erupción principal antecede una fase de calentamiento que viene a durar un día. Luego, desde el punto de la inestabilidad térmica avanza un frente caliente a través del disco, que desencadena la erupción principal. El abrillantamiento observado en TW de Virgo se ajusta muy bien a la fase de calentamiento predicha, y lo mismo ocurre con las tasas de variación registradas de la temperatura y del brillo.

Si se demuestra correcto el modelo de inestabilidad del disco para las erupciones de novas enanas, deberá facilitar la solución de muchos interrogantes que tiene abiertos la física de los discos de acreción; el principal: la naturaleza de la viscosidad. Como es inmediato, para comprender el mecanismo físico que produce la viscosidad será preciso determinar empíricamente la magnitud del efecto y su dependencia de la temperatura superficial y del radio del disco. Los investigadores que emplean modelos informáticos ligados al tiempo se han esforzado por ajustar la relación entre temperatura y densidad superficial a fin de hacer que las explosiones del modelo se asemejen a las observadas. En ese orden, podemos comprobar las teorías del calentamiento viscoso para asegurarnos de que concuerdan con el comportamiento de las novas enanas.

Se han propuesto dos mecanismos principales para explicar el calentamiento viscoso en el disco. Uno se centra en la turbulencia asociada a los movimientos convectivos que acompañan al transporte vertical de energía hacia el exterior del disco; el otro invoca la energía liberada por la rotura y reconexión de las líneas de fuerza magnéticas en el disco. Cannizzo y A. G. W. Cameron, de la Universidad de Harvard, mostraron que el calentamiento inducido por la convección reproducía algunos aspectos de la relación entre temperatura y densidad superficial necesarios para producir erupciones de nova enana.

Steven Balbus y John Hawley, del Instituto de Astronomía Teórica de Virginia, han descubierto recientemente un mecanismo mediante el cual los movimientos del gas ionizado (y por tanto magnético) incrementarían los débiles campos magnéticos que debe haber siempre. La meta siguiente consistirá en incorporar los resultados de tales estudios en una teoría global que siga la evolución temporal del disco entero para ver si los modelos pueden reproducir con suficiente minuciosidad el comportamiento registrado de las erupciones de nova enana.

El modelo de inestabilidad del disco podría explicar no sólo las variables cataclísmicas, sino también los cuásares remotos, dotados de gran energía. Durante mucho tiempo se ha jugado con la idea de que esos objetos alojen discos de acreción canalizadores de la materia hacia el interior de agujeros negros centrales con masas de millones de veces la solar. Lin y Gregory A. Shields, de la Universidad de Texas en Austin, hallaron en 1986 que la curva sigmoidea debe ser igualmente válida en esos discos de acreción gigantes. Sugirieron que las inestabilidades de disco podrían colimar chorros de materia directamente opuestos cuando el disco está en su estado más alto, produciendo con ello la secuencia de nudos que se observan en los chorros radioemisores que dimanan de ciertas galaxias activas.

La profundización en el conocimiento de los discos de acreción nos permitirá determinar la verdadera naturaleza de los cuásares y de otros fenómenos violentos que se desarrollan en los núcleos de las galaxias; entre ellos, el objeto misterioso que ocupa el centro de la Vía Láctea. Y generará también nuevas ideas sobre los discos que parecen rodear las estrellas recién nacidas, plausible lugar de gestación de planetas.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ACCRETION POWER IN ASTROPHYSICS. J. Frank, A. R. King y D. J. Raine. Cambridge University Press, 1985.

ON THE OUTBURST RECURRENCE TIME FOR THE ACCRETION DISK LIMIT CYCLE MECHANISM IN DWARF NOVAE. John K. Cannizzo, Allen W. Shafter y J. Craig Wheeler en *Astrophysical Journal*, vol. 333, n.º 1, págs. 227-235; 1 de octubre de 1988.

VISCOUS EVOLUTION OF ACCRETION DISCS IN THE QUIESCENCE OF DWARF NOVAE. Shin Mineshige y Janet H. Wood en *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 241, n.º 2, págs. 259-280; 15 de noviembre de 1989.

SPECTROSCOPY OF THE DWARF NOVA TW VIRGINIS CAUGHT ON THE RISE TO OUTBURST. Cathy S. Mansperger y Ronald H. Kaitchuck en *Astrophysical Journal*, vol. 358, págs. 268-273; 20 de julio de 1990.

La navegación de las tortugas marinas

En cuanto salen del cascarón, las tortugas marinas inician su aventura oceánica. Alcanzada la madurez, regresarán a casa para nidificar, navegando centenares de millas. ¿Qué brújula les guía? ¿Con qué mapas biológicos se orientan?

Kenneth J. Lohmann

Tras el ocaso, entrada la noche estival de Florida, cuando se atempera el calor de sus playas atlánticas, las crías de tortuga boba que acaban de hacer eclosión y se hallan inactivas en nidos subterráneos empiezan a desperezarse. En brotes esporádicos de actividad, las tortuguitas serpean y se remueven con energía, extraen arena del techo de la cámara de nidificación y la apisonan en el suelo. El piso se eleva suavemente; la cámara sube como un ascensor en miniatura, hasta que las crías logran abrirse paso entre la arena.

Las tortuguitas, ninguna de las cuales sobrepasa la mano de un niño, vienen a un mundo preñado de peligros. Perseguidas por cangrejos fantasma, zorros y mapaches, se afanan por la playa oscurecida camino del océano, para zambullirse en la resaca. Establecen en seguida el rumbo que las aleja de la costa y las adentra en alta mar. Soportando los embates de olas y corrientes, atacadas por peces y aves marinas, mantienen día y noche sus marcaciones mar adentro, al tiempo que nadan hacia el abrigo relativo que les ofrece la corriente del Golfo. Allí, entre 30 y 60 millas de la costa, encuentran refugio en los sargazos flotantes, así como alimento en forma de pequeños invertebrados. Años después, las que lleguen a la edad adulta (quizás una de cada 1000) navegarán de vuelta, camino, frecuentemente, de la misma playa donde vieron la luz; así, estación de nidificación tras estación.

¿Cómo se orientan las tortugas en su navegación por un vasto océano carente de indicadores e hitos manifiestos? Tan sólo recientemente, y combinando observaciones en el laboratorio y en el mar, se ha comenzado a percibir las señales que siguen para mantener su rumbo.

KENNETH J. LOHMANN enseña biología en la Universidad de Carolina del Norte en Chapel Hill. La Universidad de Washington le concedió el doctorado en zoología en 1988. Investiga la orientación magnética de los animales marinos y la neurobiología de la detección de campos magnéticos.

La facultad de orientación de que hacen gala parece bastante refinada y fiable. Para algunas poblaciones, la migración inicial hacia mar abierto constituye el primer paso de un periplo transoceánico que durará varios años. Tras la eclosión, las tortugas bobas (*Caretta caretta*) abandonan Florida, para no volver a ser avistadas en aguas de los Estados Unidos hasta que su caparazón mide ya más de medio metro de largo. Nadie ha podido todavía seguir el rastro de las tortuguitas adentradas en mar abierto y desaparecidas en prolongada navegación. Hay, sin embargo, pruebas circunstanciales que permiten suponerles una travesía atlántica, de un lado a otro del océano, con viaje de vuelta: existe, en efecto, una progresión creciente de tamaños de juveniles a lo largo del giro del Atlántico Norte, el sistema de corrientes oceánicas que se mueve en el sentido de las agujas del reloj y que rodea el mar de los Sargazos (la porción relativamente calma del Atlántico Norte central). Así, después de penetrar en la corriente del Golfo, las jóvenes tortugas bobas podrían nadar, Atlántico arriba, en dirección este, torcer con rumbo sur para rodear los Sargazos, y, por fin, en el regreso, hacia el oeste, hacia las playas de Florida.

Las adultas navegan con más pericia que las jóvenes. Fijémonos, por ejemplo, en las tortugas verdes (*Chelonia mydas*); frecuentan las áreas de alimentación en aguas de la costa del Brasil y migran regularmente hacia el este a través de más de 1400 millas de océano abierto hasta alcanzar sus áreas de nidificación en la isla de Ascensión. Los estudios de marcado y recaptura en esa isla han demostrado la notable fidelidad de las hembras a su lugar de nidificación; no se sabe de ninguna tortuga vista en Ascensión que haya anidado en otra parte. Pero sí llegan hasta las áreas de alimentación brasileñas después de nidificar, para retomar el camino de regreso hacia la isla de origen, a los dos o cuatro años.

La investigación reciente del grupo encabezado por John C. Avise, de la Universidad de Georgia, ha demostrado que el ADN mitocondrial de las tortugas verdes de la isla de Ascensión difiere del que caracteriza a otras poblaciones de tortugas verdes. Este estudio genético supone una prueba más de que la especie navega, una y otra vez, de vuelta a sus playas natales para nidificar, sin mezclarse con otras poblaciones.

Las tortugas verdes que nidifican en Tortuguero, Costa Rica, demuestran una fidelidad similar a sus playas natales. Ejemplares marcados aquí han sido recapturados en áreas de alimentación dispersas por todo el Caribe y, por el norte, hasta en Florida, pero no se ha hallado ni una, en los más de 30 años de marcado en Tortuguero, que nidificara en otro lugar.

El primer paso lógico para descubrir qué mecanismos emplean las tortugas marinas en la navegación consiste en determinar las señales de orientación que utilizan los animales recién salidos del cascarón. Su migración costera inicial se parece a la migración de larga distancia, ya adulta, en cuanto ambas precisan de un movimiento orientado a través de un océano desprovisto de puntos de referencia manifiestos. Crías y adultos poseen, probablemente, la misma finura sensorial. Ocurre, sin

1. TORTUGA VERDE nadando en aguas de Hawai. Estos quelonios podrían servirse del campo geomagnético y de la dirección del oleaje oceánico para navegar entre sus áreas de alimentación y sus lugares de nidificación.

embargo, que las crías son pequeñas y fáciles de estudiar en el laboratorio, mientras que los adultos pueden sobrepasar el metro de longitud y los 180 kilogramos de peso; a esa tarea me he dedicado con Michael Salmon y Jeanette Wyneken, de la Universidad Atlántica de Florida; empezamos por investigar cómo lograban las tortuguitas marinas que salen del cascarón, en la costa oriental de Florida, mantener su orientación hacia alta mar mientras nadaban en aguas costeras.

Sabíamos, de partida, que disponían, en principio, de muchas señales de orientación. Otros animales migradores, por ejemplo, fían en señales múltiples: posición del sol o las estrellas, la luz polarizada, olores, dirección del viento, infrasonidos (sonidos de baja frecuencia, así los que generan las olas rompiendo sobre una playa) y el campo magnético de la Tierra.

El campo geomagnético, en particular, constituye una de las fuentes de información direccional más penetrante y uniforme con que cuentan los animales. A diferencia de la mayoría de las demás señales potenciales, se muestra constante a lo largo del día y de la noche y apenas si le afectan los cambios atmosféricos. Físicos y biólogos ridiculizaron antaño la idea de que los animales fueran sensibles al campo geomagnético, pero las investigaciones realizadas en los últimos 15 años han demostrado que un número sorprendente de animales diversos lo acusan. Se citan, entre éstos, varias aves y peces migradores (como los salmones, los atunes y los tiburones), así como algunos anfibios, insectos y moluscos. Valía la pena, pensamos, comenzar por buscar esa facultad en las tortuguitas.

Arrancamos con la orientación de las crías de tortuga boba de Florida. El escenario: una jofaina llena de agua, de un metro de diámetro y fabricada en fibra de vidrio. En cada ensayo, enjaezábamos la cría a examinar con un arnés de nilón-licra y se la fijaba a un brazo de palanca. Podía dicho brazo girar libremente en el plano horizontal y ser halado sin dificultad por una tortuga en natación; el brazo seguía, pues, la posición de la



tortuga. La cría podía desenvolverse sin restricciones en el interior del radio definido por la atadura. En una habitación adyacente, un registrador o un ordenador conectado con el brazo de palanca proporcionaban un registro continuo de la dirección del reptil.

Al principio del ensayo encendíamos una luz mortecina en el este magnético, para que empezaran a encaminarse en la dirección apropiada. (En su hábitat natural, las tortugas que emergen de sus nidos durante la noche encuentran una señal luminosa similar en la dirección del océano, medio que refleja la luz estelar y lunar mucho mejor que la tierra.) Pasada una hora o más, desconectábamos la luz, sumiendo así a las tortuguitas en completa oscuridad.

En cuanto se apagaba la luz, las tortuguitas, diríase que confusas, dibujaban círculos por la jofaina. Pasados algunos minutos, solían establecer un rumbo seguro hacia una dirección específica, que mantenían durante varios minutos antes de reanudar las vueltas. Proseguían con ese curioso comportamiento durante horas en completa oscuridad, alternando breves períodos de natación orientada con intervalos de vueltas.

Cuando calculamos la dirección media de la natación desarrollada a oscuras, resultó evidente que los quelonios no procedían al azar; antes bien, la mayoría nadaba hacia puntos entre el norte y el este magnéticos, adoptando rumbos que los hubieran llevado lejos de la costa oriental de Florida y hacia la corriente del Golfo.

Como hipótesis de trabajo, atribuimos a la orientación magnética la preferencia direccional en plena oscuridad. Para verificar la hipótesis, necesitábamos demostrar que, cambiando la dirección del campo magnético alrededor de las tortugas, se modificaría la dirección en la que nadaban. Y con ese propósito construimos un sistema de cinco bobinas cuadradas de alambre de cobre (bobina cúbica de Rubens) y lo instalamos en torno al escenario de orientación. Cuando se activaba, la bobina generaba un débil campo magnético, relativamente uniforme, en toda la zona abarcada. Se ajustó la bobina para que produjera un campo magnético con una intensidad doble de la componente horizontal del campo de la Tierra y de sentido opuesto. Podíamos invertir a voluntad el campo magnético que las tortugas experimentaban.

Podíamos, pues, someter a prueba la orientación de las crías bajo dos condiciones distintas de campo magnético. Cada tortuguita inició el nuevo experimento nadando en el campo magnético terrestre, con una luz brillando en el este magnético. Apagábamos la luz. Dejábamos que el animal nadara en completa oscuridad bajo uno de los dos campos magnéticos. De los ejemplares sometidos a examen, se dejó que la mitad de ellos nadara en el campo magnético inalterado de la Tierra (con la bobina desconectada); la otra mitad hubo de hacerlo con la bobina conectada, es decir, con el campo magnético invertido.

Lo mismo que en el primer tipo de experimentos, las tortuguitas sometidas, en oscuridad, al campo geomagnético adoptaban por lo común rumbos entre el norte y el este magnéticos. En cambio, las tortugas probadas en el campo magnético invertido nadaban en la dirección aproximadamente opuesta. Estos datos demostraban que las crías de tortuga boba eran sensibles a la acción del campo magnético de la Tierra y podían orientarse con respecto a él.

Armados con esta nueva información, creímos haber resuelto el rompecabezas del mantenimiento del rumbo durante la migración costera. Al poco de penetrar en el océano, inferíamos, las crías comenzaban a fiar en una brújula magnética. La brújula continuaría operando después de que las tortuguitas perdieran de vista la costa, permitiéndoles persistir en su ruta uniforme hacia alta mar, hasta la corriente del Golfo.

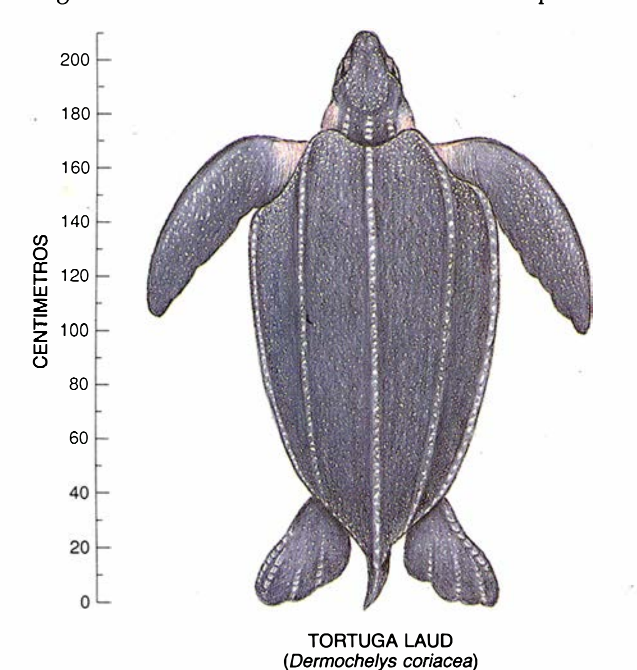
Pero esta hipótesis, formulada en el laboratorio, precisaba comprobarse en un entorno natural. Para estudiar la orientación de las crías en el océano diseñamos una jaula flotante de orientación. Atando una tortuguita a una boya flotante en la jaula, observaríamos en qué dirección nadaban.

Durante los siguientes experimentos de campo, las tortugas aleteaban vigorosamente hacia el océano abierto, aun cuando realizábamos los ensayos alejados unos 15 millas de la costa, desde donde los animales posiblemente no divisarían la playa. Supusimos, de entrada, que nadaban hacia alta mar instados por el campo geomagnético.

Pero unos días más tarde, en una cálida mañana insólitamente calma, sin brisa, el comportamiento de las tortuguitas dio un giro inesperado. Nos hallábamos con nuestro bote a escasas millas de la costa. Atamos las crías a

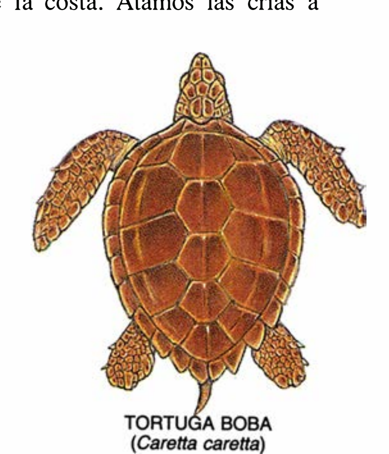
Tortugas marinas del mundo

La mayoría de las especies se encuentran en las aguas tropicales y subtropicales del globo; en alguna ocasión se han avistado tortugas laúd mucho más al norte, en la misma Escandinavia. Pero no todas gozan de tan amplia distribución. Las tortugas bastardas permanecen en aguas atlánticas, y las tortugas planas viven en el Pacífico austral, cerca de Australia. Algunos taxónomos consideran que la tortuga verde del océano Pacífico oriental es una especie distinta de las demás verdes.

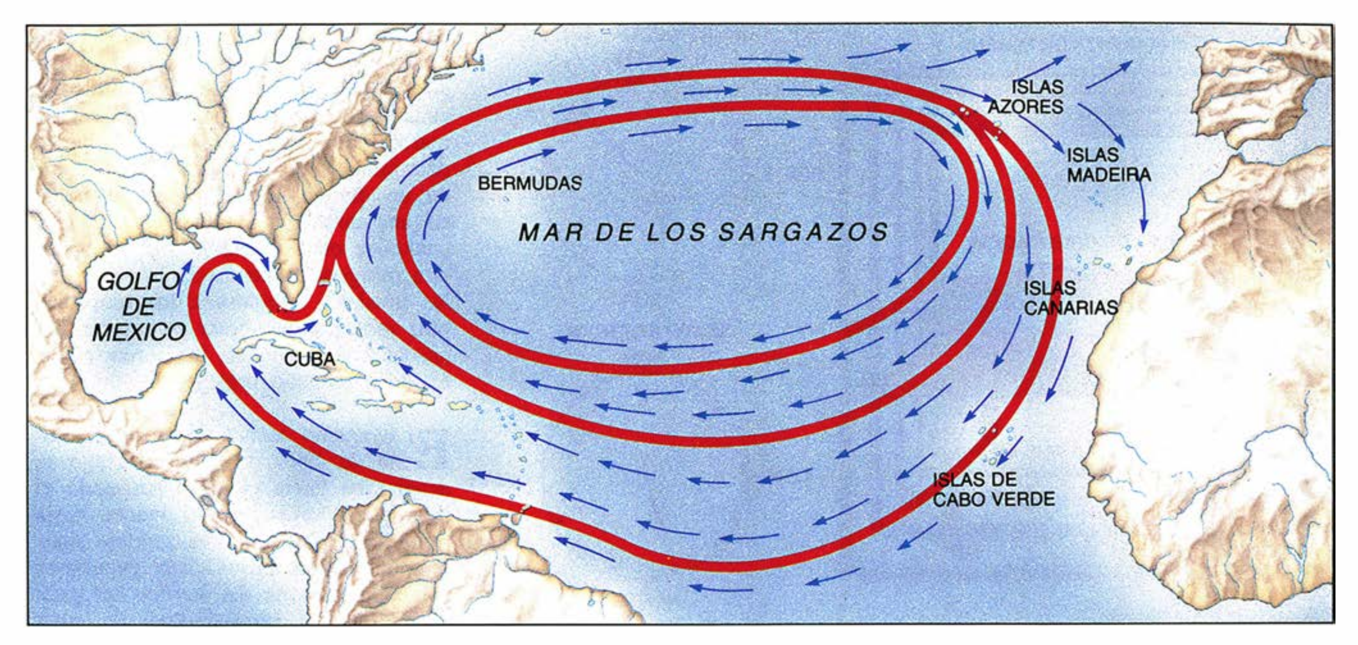


TORTUGA LAUD
(*Dermochelys coriacea*)

TORTUGA VERDE O FRANCA
(*Chelonia mydas*)



TORTUGA BOBA
(*Caretta caretta*)



2. RUTAS MIGRATORIAS de las tortugas marinas (*rojo*), que atestiguan su extraordinaria capacidad para la navegación. Tras abandonar su playa de nidificación en Florida, las crías de tortuga boba dan varias vueltas alrededor del mar de los Sargazos antes de regresar a su punto de origen para nidificar, pasados algunos años. Por entonces ya han alcanzado la mitad de su desarrollo. Las flechas indican el flujo de las corrientes.

la boya flotante, como solíamos. Por primera vez, las tortugas se comportaron entre erráticas y aturdidas: unas nadaban en círculos a la deriva, mientras que otras establecían rumbos en dirección aparentemente al azar, incluido el de retorno a la costa. También a nosotros nos embargó la confusión. Si los quelonios atendían al campo geomagnético para guiarse hacia el océano abierto, ¿por qué no se conducían como los ejemplares con los que habíamos experimentado antes?

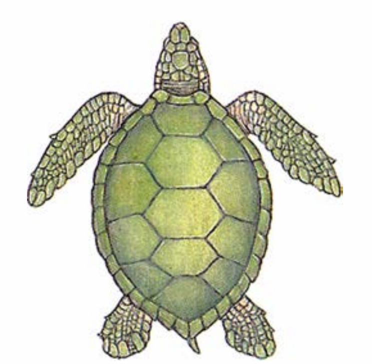
Todavía a bordo, andábamos dándole vueltas a ese cambio de conducta inesperado, cuando de repente se levantó una suave brisa, que generó pequeñas olas en la superficie cristalina del océano. Casi al mismo tiempo que notábamos esas minúsculas olas desplazándose hacia el oeste en dirección a la costa, la cría de tortuga que estaba bajo observación giró con brusquedad torciendo hacia el océano abierto, en un rumbo que cortaba directamente las olas que se acercaban. Proseguimos la observación de otras tortuguitas en las nuevas condiciones meteorológicas; la aparición de las olas promovió que todas las crías nadaran hacia ellas, al mar abierto, tal como habían hecho las tortugas probadas los días anteriores.

¿Significaba aquéllo que nuestros quelonios veían en la dirección del oleaje la señal de orientación? Para salir de dudas, nos llevamos al laboratorio crías de tres especies distintas: tortuga boba, tortuga verde y tortuga laúd (*Dermochelys coriacea*). Las introdujimos en un tanque de olas, construido en parte con vigas de acero para distorsionar el campo magnético local. En estas condiciones, las tortuguitas no mostraron preferencias direccionales cuando no había oleaje, pero, en cuanto se provocaron olas, nadaron hacia ellas, demostrando así que podían mantener un rumbo uniforme utilizándolas como señal de orientación.

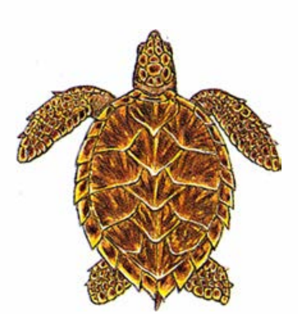
Al menos en el laboratorio, quedaba claro que las tortuguitas estaban facultadas para guiarse al detectar el oleaje, así como al detectar el campo geomagnético. Pero, ¿qué sucede en condiciones naturales? ¿Se guían, en su migración hacia mar abierto, por el oleaje, el campo geomagnético o por una tercera señal distinta de esas dos mencionadas? ¿Cuándo prima una señal u otra? ¿Acaso se valen de una combinación de señales? Si usan el campo geomagnético, ¿por qué razón las tortugas examinadas en el océano aquella jornada de mar en calma no tomaron la ruta acostumbrada guiadas por su brújula magnética?

Preguntas, todas, sin fácil respuesta. En las pocas ocasiones en que las olas avanzaban en direcciones distintas de la que indicaba el lugar de la costa, las tortuguitas confinadas en la jaula flotante solían bracear hacia el oleaje, con independencia de la dirección de origen de las olas. A pesar de evidencia tan contundente, las dudas persistían: cabía, en efecto, la posibilidad de que la limitación que imponía a las tortugas el sistema de enjaezamiento hubiera impedido que las crías aprovecharan otras señales, hasta el momento desconocidas.

Hará unos veinte años, Marion Manton y sus colegas, de la Universidad



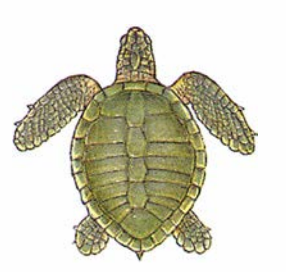
TORTUGA PLANA
(*Chelonia depressa*)



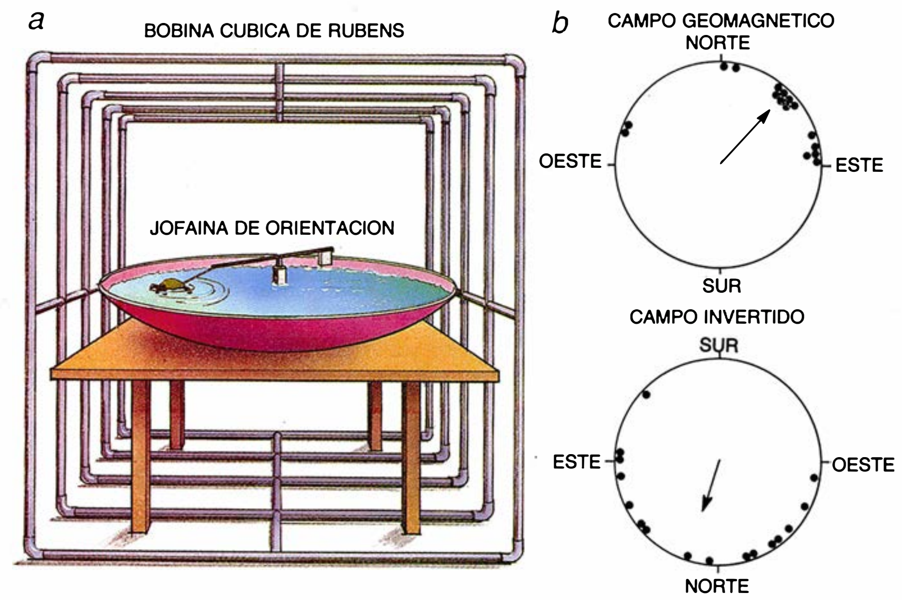
TORTUGA CAREY O DE ESCAMAS
(*Eretmochelys imbricata*)



TORTUGA BASTARDA O DE KEMP
(*Lepidochelys kempi*)



TORTUGA OLIVACEA
(*Lepidochelys olivacea*)



3. ESTE DISPOSITIVO DE ORIENTACION MAGNÉTICA DEMUESTRA que las tortuguitas bobas de Florida se hallan capacitadas para detectar el campo geomagnético (*a*). Atábase la tortuguita al brazo de palanca, que traza electrónicamente la dirección de natación del reptil. La bobina cúbica de Rubens se emplea para invertir la dirección del campo magnético. Los resultados (*b*) muestran que la mayoría de los individuos (*puntos*) nadan en direcciones entre el norte y el este magnéticos en ambas condiciones. La flecha representa la dirección media del grupo.

de Columbia, demostraron en estudios de laboratorio que las tortugas verdes juveniles detectaban sustancias químicas disueltas en el agua. Si las crías de quelonios migraran normalmente hacia alta mar mediante la detección de un gradiente químico (o incluso un gradiente de temperatura o de salinidad), que se extendiera desde la corriente del Golfo hasta la costa de Florida, entonces el enjaezarlas en un confinamiento fijo les impediría comparar el agua en localizaciones distintas, y no podrían, pues, detectar gradiente alguno. En resumen, cabía la posibilidad de que las tortuguitas atadas nadaran hacia las olas porque no dispusieran de otras señales que prefirieran usar.

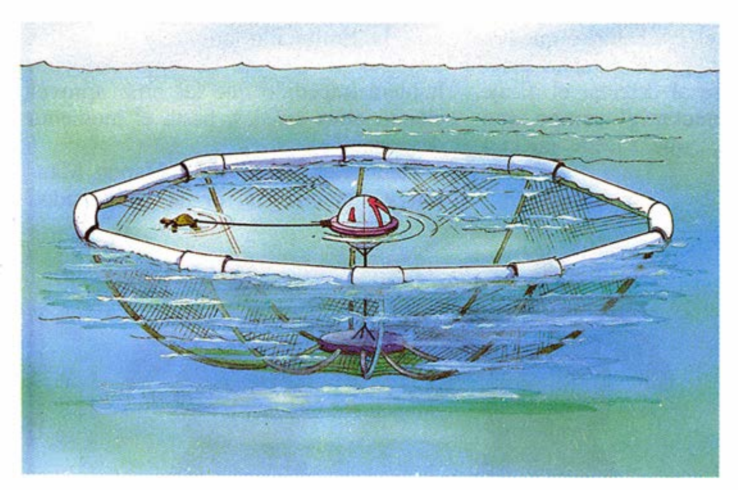
Para resolver esas objeciones, estudiamos la orientación de ejemplares sin atar, libres en aguas costeras. A diferencia de los experimentos con jaulas flotantes, prescindimos del seguimiento continuado durante largo tiempo. Nos limitamos a soltar las crías una a una en el océano y registrar la dirección que tomaban en su aleteo mar adentro. Era de presumir que allí tuvieran acceso a todas las señales de que disponían durante su migración oceánica normal.

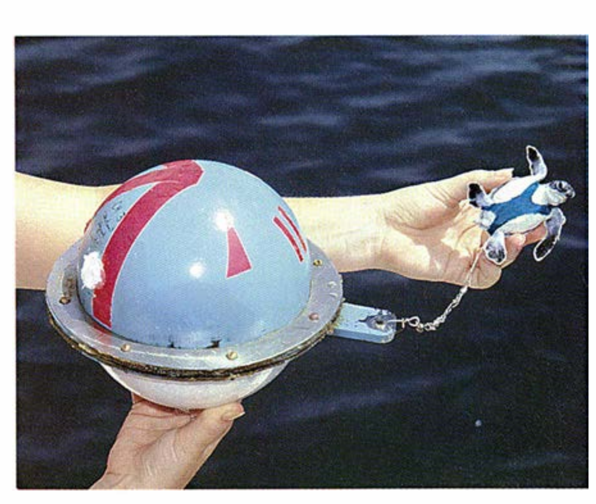
En las pruebas iniciales realizadas en condiciones meteorológicas típicas, las tortuguitas libres se orientaban hacia las olas en su navegación de partida. Sin embargo, y puesto que las olas venían de alta mar, tal comprobación no nos revelaba nada nuevo. Estábamos como antes: las crías podrían haberse guiado por el oleaje, el campo geomagnético, un gradiente químico o cualquier otra señal para establecer su marcación. Para calibrar la importancia determinante de las olas, precisábamos de un día en que el oleaje avanzara en una dirección insólita, es decir, en cualquier otra dirección que no apuntara ortogonalmente hacia la costa. No les quedaría entonces a los quelonios otro remedio que optar por nadar hacia las olas o dirigirse hacia mar abierto, aprovechando otra señal.

El momento ansiado llegó en el otoño de 1989. El huracán Hugo se desplazaba hacia el norte barriendo el litoral de Florida. En su avance hacia tierra firme, la tormenta produjo unas condiciones meteorológicas peculiares sobre buena parte del sudeste del país. Cierta mañana, poco después de haber pasado el huracán, nos despertamos con un fuerte viento que soplaba del oeste, del continente al mar. Era una ocasión de oro para nuestros propósitos. Llenamos de tortuguitas una nevera de porexpán y salimos prestamente al mar en nuestra barca de investigación.

Cinco millas mar adentro encontramos lo que andábamos buscando: una zona donde las olas avanzaban en clara dirección este, hacia el océano abierto y alejándose de tierra. En estas condiciones raras y transitorias, soltamos las crías, de una en una, y observamos el rumbo que tomaban. Los resultados no dejaban muchos resquicios para la duda: la mayoría se dirigieron hacia las olas, aun cuando esa orientación las devolvía a la playa.

La fortuna nos permitió repetir el experimento varias veces durante las semanas siguientes, siempre que unas condiciones meteorológicas insólitas generaban oleaje en direcciones atípicas. En cada caso, las tortuguitas nadaron hacia las olas que se acercaban,





4. ESCENARIO FLOTANTE DE ORIENTACION, para estudiar las señales que las tortuguitas emplean en el océano. La tortuga, enjaezada (*fotografía*), se ata a una boya parcialmente sumergida. La red que ciñe a la boya protege a la cría de los depredadores. Gracias a la facilidad de giro de la boya, la tortuga podrá navegar en cualquier dirección. La mayoría de las tortuguitas se dirigieron ortogonalmente a las olas que se acercaban.

con independencia de la dirección magnética de la que provenía el oleaje. Confirmábase que las crías se apoyaban realmente en la dirección de propagación de las olas para guiar su migración oceánica.

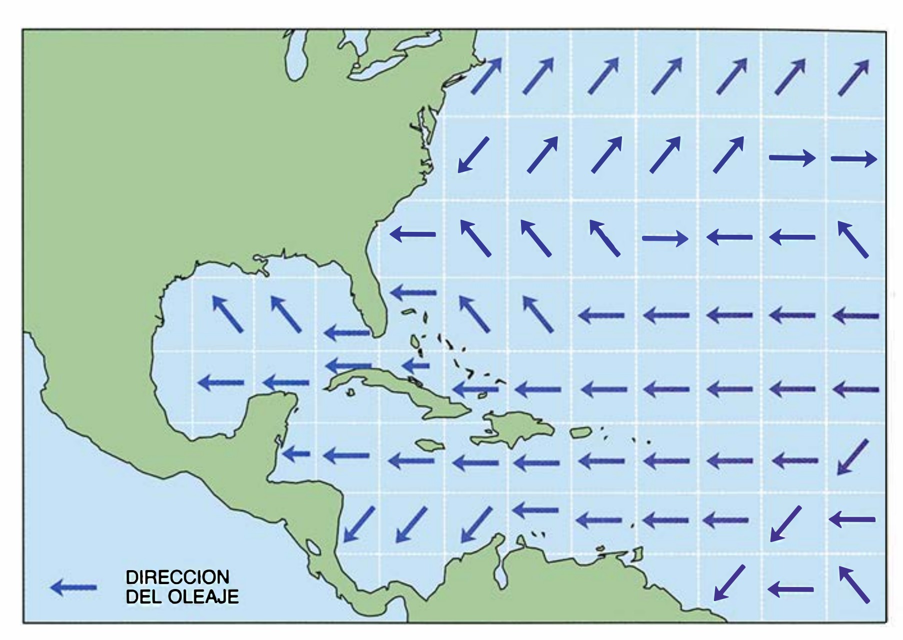
¿Por qué habrían de recurrir a las olas oceánicas para orientarse? Las olas que penetran en las aguas someras cerca de la playa se refractan hasta que se mueven en dirección a la línea de costa; el movimiento del oleaje constituye normalmente un indicador fiable de la dirección hacia alta mar: nadar hacia las olas suele resultar en un movimiento hacia el mar abierto.

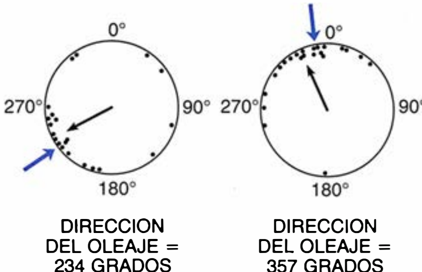
Aunque la dirección del oleaje es, por lo que se ve, la señal principal de la que se sirven durante las primeras fases de migración a mar abierto, pueden atender a otras señales, de manera simultánea o subsecuente. En este contexto y llegado el caso, el sentido magnético podría remplazar la orientación del oleaje cuando los quelonios se adentraran en aguas más profundas, donde las olas son un indicador menos fiable de la dirección hacia mar abierto. Tampoco puede descartarse que encuentren apoyo parcial en otros mecanismos, incluidas las señales quimiosensoriales, visuales u otras todavía no identificadas.

Por notable que nos parezca esa capacidad de orientación que adorna a las crías, las tortugas adultas logran hazañas marinas que entrañan mayor complejidad y demandan mayor finura. No es fácil, sin embargo, seguir el rastro de estos animales a través de las inmensas extensiones de agua que navegan en su migración, ni su tamaño o peso son los más adecuados para acometer experimentos de laboratorio. Pero con lo poco que se ha investigado sobre adultos (en buena parte estudios de marcado y recaptura) y nuestra propia experiencia con crías sí podemos inferir los problemas de navegación que se les plantea a las tortugas adultas y barruntar las vías posibles de solución que toman.

Una diferencia importante entre las crías y los adultos estriba en la verosímil capacidad de los segundos para fijar su posición con respecto al destino. Puesto que la corriente del Golfo fluye paralela a la costa, las tortuguitas de Florida sólo precisan mantener un rumbo constante hacia alta mar para intersecar la corriente. Tal orientación puede conseguirse con un “sentido de brújula” simple o quizá sólo nadando en dirección al oleaje. Pero no basta esa brújula interna para guiar el regreso de la tortuga adulta hacia su playa específica de nidificación; tiene que saber, además, dónde se encuentra. Los etólogos llaman “sentido de mapa” a esa capacidad de algunos animales.

Para comprender la diferencia entre el sentido de brújula y el sentido de mapa, considérese la angustiosa situación en que el lector se encontraría si se le vendaran los ojos, se le llevara en helicóptero al claro de una selva ilimitada, se le diera una brújula y se le dijera que el vuelo de retorno saldría una hora más tarde de otro calvero, situado exactamente en el centro del bosque. Con la ayuda de la brújula, el lector podría mantener un rumbo recto, pero no tendría por qué conducirle directamente a su destino en el tiempo fijado. Debería empezar por saber dónde está con respecto al calvero central (si al este o al norte de aquél). Además de la brújula, por sí sola insuficiente, el lector precisaría un mapa, o un sentido de mapa.





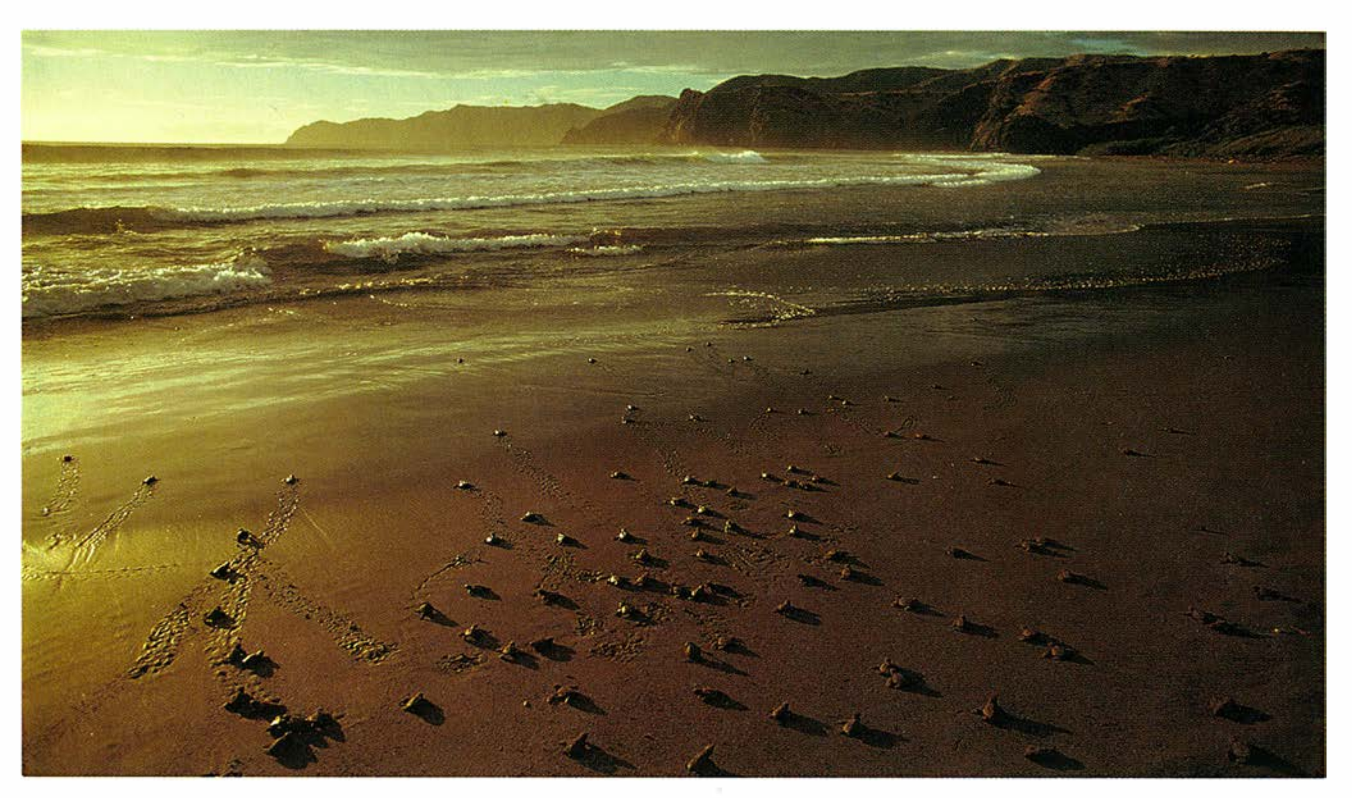
5. LA DIRECCION DEL OLEAJE suele proporcionar una buena señal de orientación: durante la estación de eclosión, las olas avanzan hacia la costa (*arriba*). El rumbo tomado por tortuguitas abandonadas en el océano durante condiciones meteorológicas insólitas confirma su recurso al oleaje para guiarse en la migración hacia mar abierto. Nadan hacia el oleaje aunque la dirección las devuelva a la costa (*izquierda*).

Sabemos poco del sentido de mapa de los animales. Tan sólo se ha investigado con profundidad en las aves, pero los expertos no se ponen de acuerdo sobre la naturaleza precisa del mapa o sobre las señales usadas. Ahora bien, lo mismo en las aves que en las tortugas marinas la capacidad de detectar campos magnéticos es la idónea, en teoría, para determinar la posición.

Varios parámetros geomagnéticos varían de manera uniforme y predecible según la latitud; así, la inclinación de la línea de campo (ángulo con que las líneas del campo magnético intersecan la superficie de la Tierra, a veces llamado ángulo de inclinación) y la intensidad de campo en las direcciones horizontal y vertical. Cualquiera de estas magnitudes podría servir de componente de un mapa para determinar la posición con respecto a un objetivo.

Las tortugas marinas disponen, en potencia, de una fuente adicional de información magnética: las bandas de máximos y mínimos magnéticos del suelo marino. Estas bandas se presentan en las zonas de expansión del fondo oceánico, áreas de alejamiento de las placas. La velocidad de separación de las placas se cifra en unos pocos centímetros al año, y en ese hiato aflora continuamente material fundido sobre el suelo oceánico. Cuando ese material emergido se enfría, adquiere una magnetización paralela a la dirección del campo geomagnético.

La polaridad del campo magnético de la Tierra se ha invertido a intervalos irregulares durante la historia del planeta: por lo menos 23 veces sólo en los últimos cinco millones de años. Por consiguiente, las bandas de fondo oceánico formadas durante períodos de polaridad geomagnética opuesta están magnetizadas en direcciones opuestas. A medida que el suelo oceánico se expande, las placas se van distanciando mutuamente, proceso que con el tiempo produce una serie de bandas alternas a lo largo del fondo oceánico. La señal magnética de cada banda puede



6. TORTUGAS MARINAS acabadas de salir del cascarón corretean por la playa Nancite, en Santa Rosa, Costa Rica, en busca de la relativa seguridad que les ofrece el océano. Las contadas tortugas oliváceas que alcancen el estado adulto navegarán de vuelta a la misma playa para nidificar.

sumarse al campo geomagnético local, aumentando ligeramente el campo total (creando máximos magnéticos), o bien se opone al campo actual de la Tierra, reduciéndolo (lo que resulta en mínimos magnéticos).

Podemos detectar tales bandas de intensidad magnética máxima y mínima en regiones muy extensas de océano abierto. El grupo de Joseph L. Kirschvink, del Instituto de Tecnología de California, ha demostrado que las ballenas y los delfines quedan con frecuencia varados en playas donde los mínimos magnéticos intersecan la tierra, lo que da pie para suponer que los cetáceos siguen esas rutas en su migración. Dichas sendas podrían proporcionar información direccional a las tortugas migrantes.

Si la naturaleza del sentido de mapa prosigue envuelta en el misterio, no conocemos mejor las señales de brújula utilizadas por las tortugas adultas para guiarse en su navegación. El campo magnético constituye una posibilidad clara; otra, la dirección de propagación de las olas. A propósito de esta segunda, recordemos que, en muchas partes del océano abierto, el oleaje y la marejada o mar tendida proporcionan una señal direccional uniforme durante gran parte del año. Las marejadas oceánicas reflejan pautas de vientos reinantes sobre enormes extensiones de aguas abiertas y que perduran un tiempo considerable. La dirección de propagación de las marejadas en un área dada viene, pues, determinada por las condiciones de vientos reinantes a cientos o miles de millas de distancia; debido a ello, la dirección de la mar tendida es bastante independiente de las pautas de vientos locales y apenas varía durante semanas o meses. El fenómeno de la constancia estacional de la dirección de la marejada se conoce desde antiguo; ya los navegantes polinesios la empleaban en sus largos viajes.

Ignoramos si las tortugas adultas utilizan las olas como señal. Verosímilmente, en plena migración oceánica, los quelonios navegan con rumbo que no siempre será ortogonal a las olas. Por tanto, la tendencia manifestada por las crías de encaminarse hacia las olas podría dejar paso, en juveniles y adultos, a una capacidad de mantener el rumbo en un ángulo fijo con respecto a las olas (una brújula de olas).

Al menos en algunas migraciones, las tortugas podrían aprovecharse de signos quimiosensoriales. En esa línea milita la hipótesis según la cual las tortugas verdes de la isla de Ascensión retornarían, desde cientos de millas de distancia, a su playa de nidificación guiadas por sustancias químicas disueltas y exclusivas de la isla (una rúbrica química). De acuerdo con los cálculos realizados por Arthur L. Koch y sus colegas, de la Universidad de Florida, la concentración de sustancias químicas naturales que penetran en el mar en la isla de Ascensión podría diluirse sorprendentemente poco (sólo del orden de 100 a 1000 veces) antes de llegar al Brasil.

Pero son varias las objeciones que se levantan contra la hipótesis exclusivista de las señales químicas en la orientación marina de las tortugas. En primer lugar, es casi seguro que las tortugas verdes situadas cerca de la costa de Brasil no pueden detectar un gradiente químico que se origine en Ascensión sin muestrear y comparar el agua en localidades separadas por muchas millas. En segundo lugar, la capacidad manifestada por las tortugas verdes que anidan en Tortuguero (y en otras partes) de converger hacia playas de nidificación específicas, desde regiones de alimentación muy dispersas (situadas unas a favor de la corriente y otras a contracorriente), denuncia la existencia de mecanismos de navegación que no son estrictamente quimiosensoriales.

La orientación basada en las posiciones de las estrellas nos parece, asimismo, improbable. Aunque muchas aves migradoras se guían mediante pautas estelares, los estudios anatómicos de los ojos de tortugas de mar realizados por Koch, en la actualidad en la Universidad de Indiana, y su colega David W. Ehrenfeld, de la Universidad de Rutgers, han revelado la extrema miopía de las tortugas marinas adultas cuando sacan la cabeza del agua. Podemos afirmar, con suficiente seguridad, que son incapaces de dis-

cernir configuraciones estelares durante la noche.

Su extraordinaria dotación para navegar ha contribuido, sin duda, a su éxito evolutivo, permitiéndoles explotar áreas de alimentación muy alejadas de las zonas de nidificación. Constituye un grupo antiguo de animales, sin modificaciones reseñables durante millones de años, como pone de relieve el registro fósil.

No obstante esa dilatada historia, las tortugas marinas han de hacer frente ahora a las amenazas sin precedentes para su supervivencia. Años enteros de implacable pesca de los adultos y de recolección de los huevos han eliminado por completo algunas poblaciones nidificantes. Muchas otras corren igual peligro de desaparición tras la pérdida de playas de nidificación ante la presión humana, la contaminación creciente y la extensión de las faenas pesqueras, en cuyas artes mueren ahogadas. La tortuga laúd y la tortuga verde, dos de las tres especies marinas que nidifican en Florida, se hallan en peligro de extinción, y la tercera (la tortuga boba) se encuentra acosada. Si añadimos a ello la tenaz fidelidad al área de nidificación que caracteriza a muchas especies, habrá que reconocer la inviabilidad de recomponer poblaciones diezmadas con individuos procedentes de otras áreas.

Pero existe alguna esperanza. El conocimiento de las señales de orientación que usan las crías permite soltar ejemplares mantenidos en el laboratorio en condiciones que maximizan sus probabilidades de migrar con éxito a alta mar. Los conservacionistas intentan asimismo explotar las proezas de navegación de las tortugas trasladando huevos a playas protegidas. Las tortugas que nazcan en los abrigos seguros pueden volver a ellos a nidificar. Conocer las claves de navegación de esos quelonios adultos facilitaría su manipulación y engañar a las hembras para que, de regreso, nidifiquen en playas protegidas. El estudio de los mecanismos de orientación, además de aclarar uno de los sistemas de navegación más refinados que la evolución ha ideado, habrá de ayudar a salvar a estos animales de la extinción.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SO EXCELLENT A FISHE: A NATURAL HISTORY OF SEA TURTLES. Edición revisada. A. Carr. Charles Scribner's Sons, 1984.

RIPS, FADS, AND LITTLE LOGGERHEADS. Archie Carr en *Bioscience*, vol. 36, págs. 92-100; febrero de 1986.

MAGNETIC ORIENTATION BY HATCHLING LOGGERHEAD SEA TURTLES. K. J. Lohmann en *Journal of Experimental Biology*, vol. 155, págs. 37-49; enero de 1991.

Factores de transcripción específicos de tejido

La purificación del primer factor de transcripción específico de tejido, el del gen de la hormona del crecimiento, ha permitido el estudio molecular de la regulación de la expresión genética durante la diferenciación de la pituitaria

José Luis Castrillo

Los organismos pluricelulares están constituidos por un conjunto de tejidos y tipos celulares especializados en determinadas funciones biológicas. Desde un enfoque bioquímico, la especialización de la función es consecuencia de la existencia de proteínas propias de un tipo celular dado. La producción de anticuerpos por los linfocitos *B*, de hormonas hipofisarias en la pituitaria anterior o de insulina por células pancreáticas forman una pequeña muestra de esa especialización.

Ahora bien, puesto que se acepta que todas y cada una de las células de un organismo contienen el mismo material genético (en términos cuantitativos, al menos), deberá existir un mecanismo que asegure la expresión, ordenada y específica, de cada uno de los genes característicos de un tejido o de un tipo celular. El estudio molecular de la expresión genética específica de tejido en eucariotas, así como de su control temporal durante la diferenciación de un organismo, constituye una de las áreas de investigación más apasionantes de la biología actual.

La transmisión de la información genética desde el ADN hasta la proteína tiene lugar a través de un proceso complejo y sometido a múltiples formas de regulación: existencia de genes repetidos o metilación del ADN; iniciación, elongación y terminación de la transcripción; procesamiento diferencial ("splicing"), transporte y estabilidad de los ARN mensajeros (ARNm); estructura secundaria de los ARNm e iniciación de la síntesis de proteínas. Como se destaca más adelante, la iniciación de la síntesis de ARNm constituye la etapa decisiva en el control de la expresión genética específica de tejido.

JOSE LUIS CASTRILLO trabaja en el Centro de Biología Molecular del Consejo Superior de Investigaciones Científicas en Madrid. Tras doctorarse en química, en 1986, por la Universidad Autónoma de Madrid, se trasladó a la de California en San Diego para investigar sobre factores de transcripción específicos de tejido.

Durante la síntesis de ARNm, en el llamado proceso de transcripción, la secuencia de nucleótidos (A, G, C o T) existente en la doble cadena de ADN de un gen se copia, se transcribe, en una secuencia lineal, y complementaria, de nucleótidos (U, C, G o A). Esta secuencia de nucleótidos que constituyen el ARNm, reconocida por los ribosomas, se traduce en la secuencia de aminoácidos de la proteína. El proceso de transcripción es, en los eucariotas, muy complejo, y en el mismo intervienen la enzima ARN polimerasa II (ARN pol II) y diversas proteínas asociadas, denominadas factores de transcripción (TF).

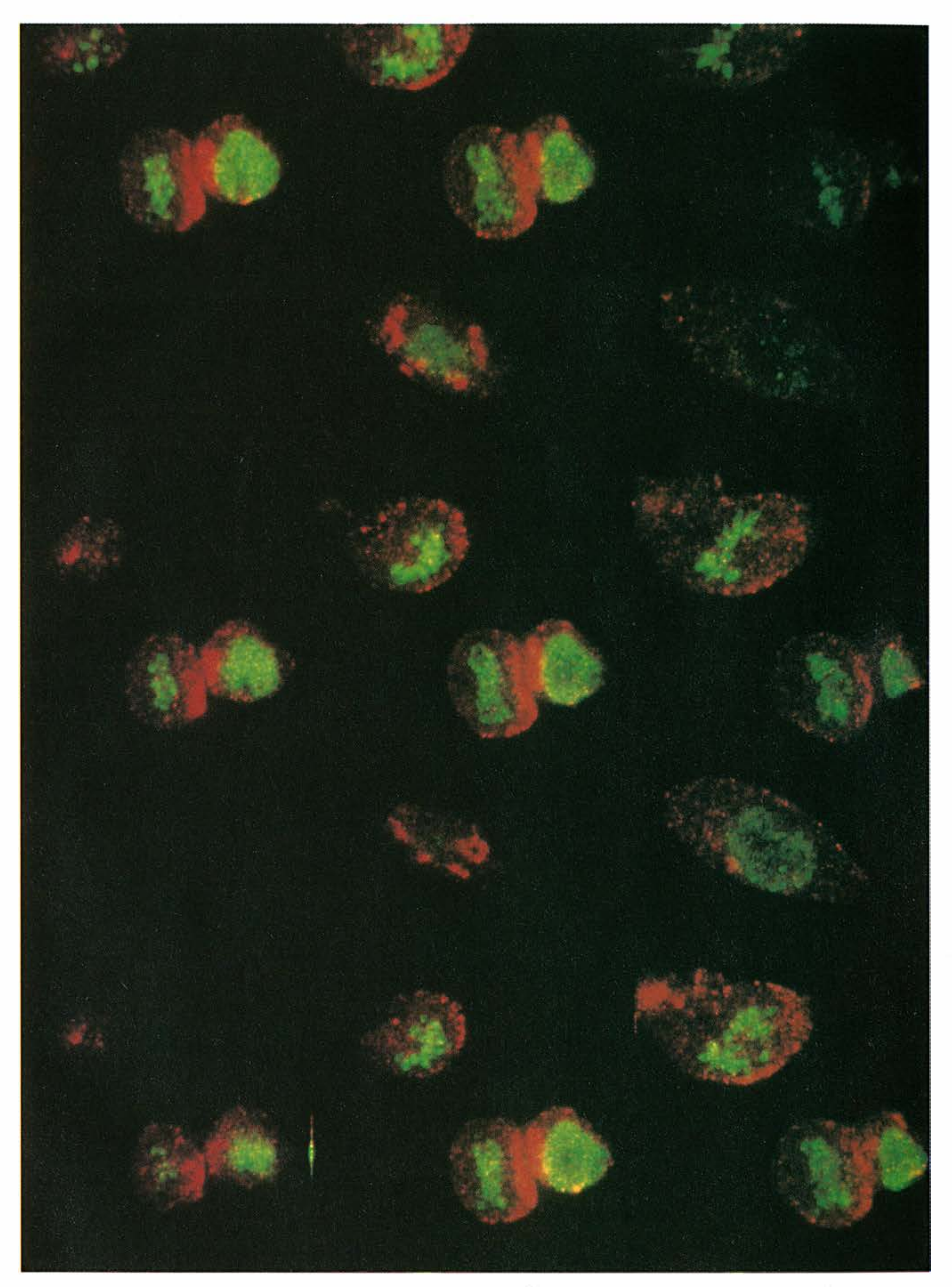
En la fase de comienzo o iniciación de la transcripción de un gen por la ARN pol II, encontramos dos regiones diferentes de ADN que desempeñan un papel principal en la regulación del gen: una región promotora (el promotor, como también se la conoce) y una región activadora (el activador, o "enhancer"). El promotor de un gen es una región de ADN que se localiza en la posición 5′ adyacente al primer segmento transcrito, o exón, de ese gen. La región promotora contiene secuencias necesarias para la expresión de niveles basales de ese gen (piénsese, por ejemplo, en la secuencia TATA, así llamada por los nucleótidos iniciales de la región) y, también, secuencias importantes en la expresión específica de tejido.

El activador puede quedar lejos de la zona de iniciación de la transcripción (distante, tanto en posición 5′ como 3′). No depende de su orientación y contiene secuencias responsables de la síntesis de ARN. Algunos activadores confieren especificidad de tejido, en tanto que otros regulan la transcripción en respuesta a hormonas, iones pesados o suero.

Se ha demostrado que las secuencias de ADN de las regiones promotora y activadora interactúan directamente con los factores de transcripción. Tenemos, por ejemplo, que el factor TFIID (que abrevia la expresión factor de transcripción D de la ARN polimerasa II) entra en interacción con la secuencia TATA y asegura la correcta iniciación del proceso de transcripción dirigido por la enzima ARN pol II. Otros factores, así el receptor de los glucocorticoides (RGC), modulan los niveles de síntesis de ARNm al unirse (en presencia de la hormona) a su secuencia de ADN específica. Las proteínas que interaccionan con las secuencias de ADN responsables de la expresión de ese gen en un tipo celular determinado se denominan factores de transcripción específicos de tejido.

La pituitaria anterior o adenohipófisis es una glándula endocrina situada en la base del hipotálamo. Está constituida por un conjunto de tipos celulares especializados en la secreción de diversas hormonas: adrenocorticotropina (ACTH), tirotropina (TSH), hormona gonadotropina estimulante del folículo (FSH), gonadotropina luteinizante (LH), prolactina (PRL) y hormona del crecimiento (GH). La hormona del crecimiento se sintetiza, de manera exclusiva, en las células somatotrópicas de la pituitaria anterior.

La expresión específica de tejido del gen de la hormona del crecimiento (GH) está controlada, en la fase de iniciación de la transcripción, por un solo factor: GHF-1. Este factor de transcripción se une al promotor del gen *GH* en dos regiones: sitio P (proximal) y sitio D (distal), comprendidos dentro de los primeros 290 nucleótidos del promotor. Esta simplicidad contrasta con los múltiples elementos y factores de transcripción que regulan la ex-



1. CELULAS GH3 PRODUCTORAS de hormona del crecimiento, analizadas mediante doble inmunofluorescencia. La proteína nuclear GHF-1 (*verde*) es un factor de transcripción específico de tejido responsable de la expresión de la hormona de crecimiento (*rojo*) en la pituitaria anterior. Las nueve "secciones ópticas" corresponden a sucesivos planos focales; se obtuvieron con un microscopio confocal, digitalizadas y procesadas.

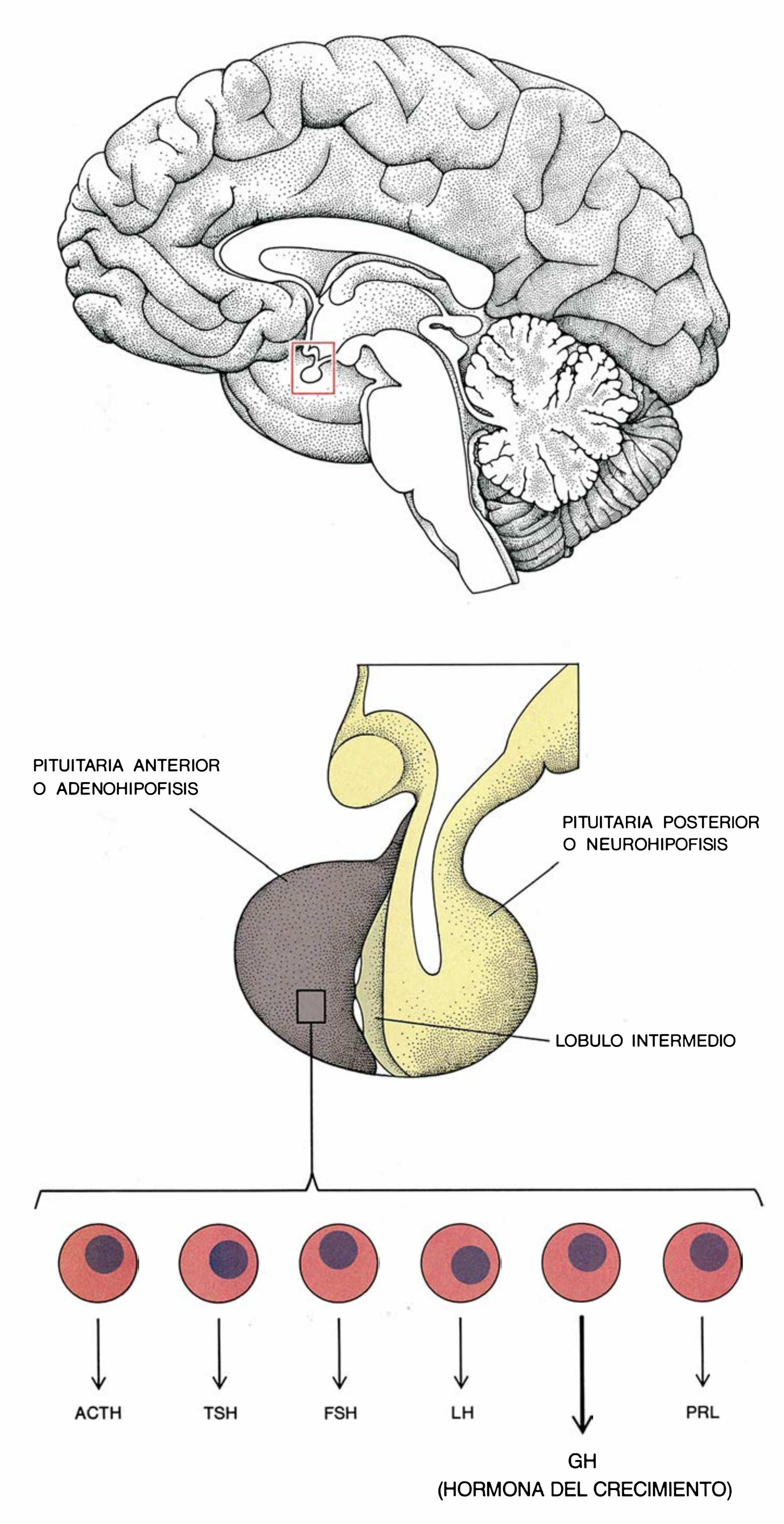
presión de otros genes específicos de tejido, como las inmunoglobulinas, insulina o albúmina. El promotor de la hormona del crecimiento constituye, por tanto, un sistema experimental ideal para el estudio del control de la expresión genética específica de tejido.

El gen humano de la hormona del crecimiento se encuentra en el cromosoma 17; allí se ha cartografiado en una región de 60 kilobases de extensión, región que engloba una familia génica que comparte una gran homología de secuencia. A esta familia pertenecen los siguientes genes: *GH-N*, *GH-V* y genes determinantes de la hormona somatotropina coriónica. El gen *GH-N* se transcribe en la pituitaria anterior; el *GH-V* constituye una variante del anterior que se encuentra inactivada. Los genes que codifican para la hormona somatotropina coriónica (*CS-L*, *CS-A* y *CS-V*) se transcriben únicamente en la placenta.

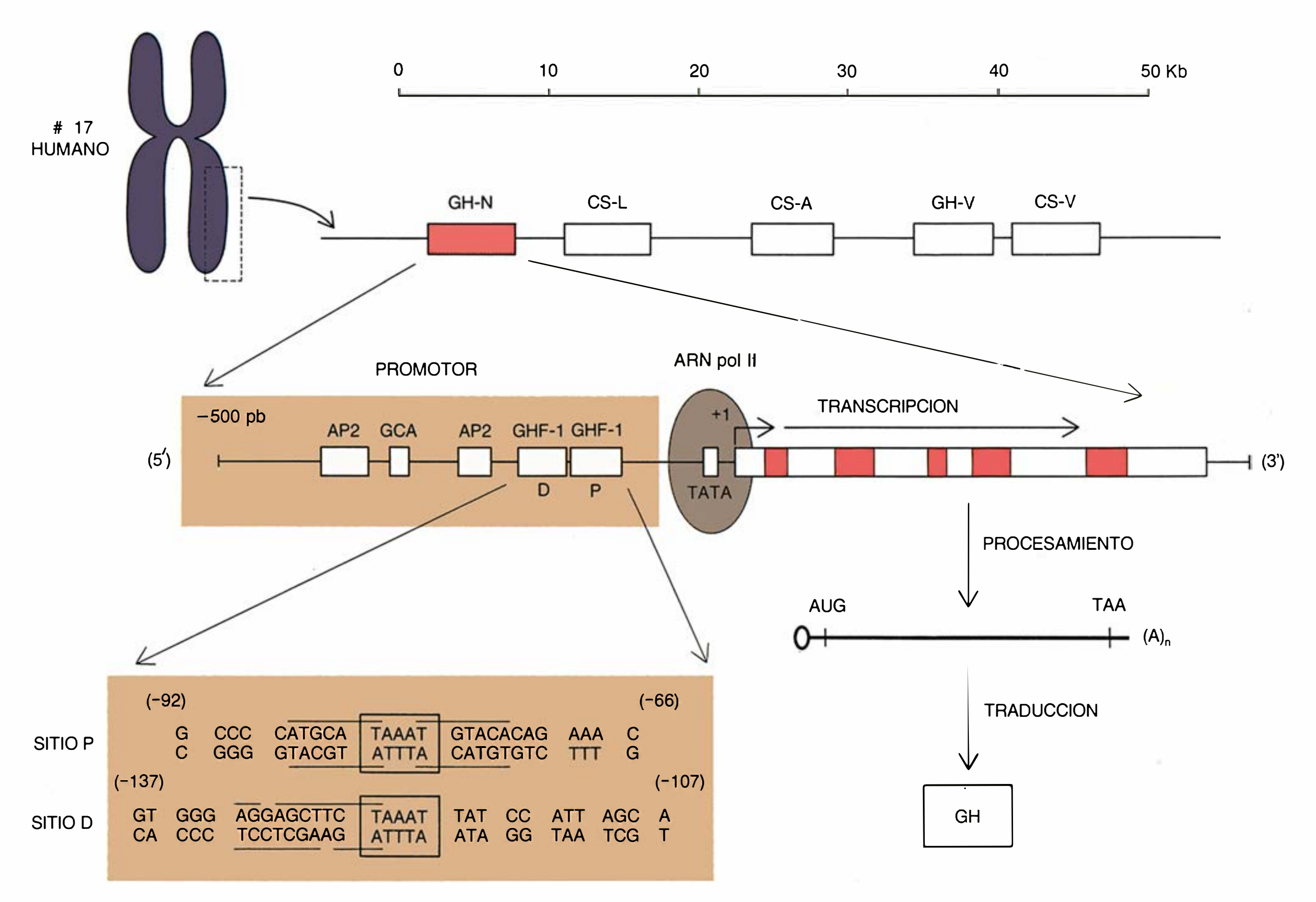
La expresión del gen *GH-N* en la pituitaria anterior está modulada por una compleja regulación hormonal. De estimular su producción se encargan el factor liberador de GH (o GHRF), los glucocorticoides (GC) y la hormona tiroidea (T3); de inhibirla, la hormona somatostatina.

El promotor del gen de la hormona del crecimiento abarca una región de 500 pares de bases situadas en posición 5′ con respecto al sitio de iniciación de la transcripción utilizado por la ARN polimerasa II. Varias proteínas interaccionan con el promotor; entre ellas, los factores de transcripción constitutivos, presentes en diferentes tipos celulares, como el factor de transcripción IID, la proteína activadora 2 y el receptor de los glucocorticoides. Cada uno de estos factores reconoce una secuencia de nucleótidos específica en el promotor. El conjunto de estas interacciones ADN-proteína sirve de señal para que la ARN polimerasa II inicie la síntesis del ARN mensajero de la hormona de crecimiento.

Los primeros 290 nucleótidos del promotor del gen de la hormona del crecimiento son suficientes para conferir especificidad de tejido en células en cultivo. Para llegar a su demostración se procedió del modo siguiente. Se partió de la fusión de esta región del promotor con un plásmido portador del gen cloramfenicol-acetiltransferasa (*CAT*), gen este que determina una proteína bacteriana cuya actividad es objeto de ensayo en el laboratorio. (Llámase plásmido al elemento genético extracromosómico y prescindible, con replicación autónoma, y que se utiliza de vector en ingeniería genética.) A continuación, el plásmido resultante (*p*GH-CAT) se introdu-



2. PITUITARIA ANTERIOR o adenohipófisis: se halla en la base del hipotálamo y está constituida por células especializadas en la secreción de diferentes hormonas: adrenocorticotropina (ACTH), tirotropina (TSH), hormona gonadotropina estimulante del folículo (FSH), hormona gonadotropina luteinizante (LH), prolactina (PRL) y hormona del crecimiento (GH).



3. MAPA DEL GEN HUMANO de la hormona del crecimiento (GH), localizado en una región de 60 kilobases del cromosoma 17; la región engloba una familia génica que comparte una gran homología de secuencia. A esta familia pertenecen los genes: *GH-N* (el gen *GH* que se transcribe en la pituitaria anterior), *GH-V* (variante génica que se encuentra inactivada) y los genes que determinan la hormona somatotropina coriónica (*CS-L A* y *V*). El promotor del gen *GH-N* comprende una región de 500 pares de bases situadas en posición 5' con respecto al sitio de inicio de la transcripción (+1), utilizado por la ARN polimerasa II. Es en esta región donde se produce la interacción entre el ADN y las proteínas reguladoras de la expresión del gen GH: factor de transcripción (GHF-1), receptor de glucocorticoides (GCR) y proteína activadora 2 (AP2). La proteína GHF-1 es un factor de transcripción específico de tejido (pituitaria anterior) que se une al ADN en dos regiones del promotor GH: proximal (P) y distal (D).

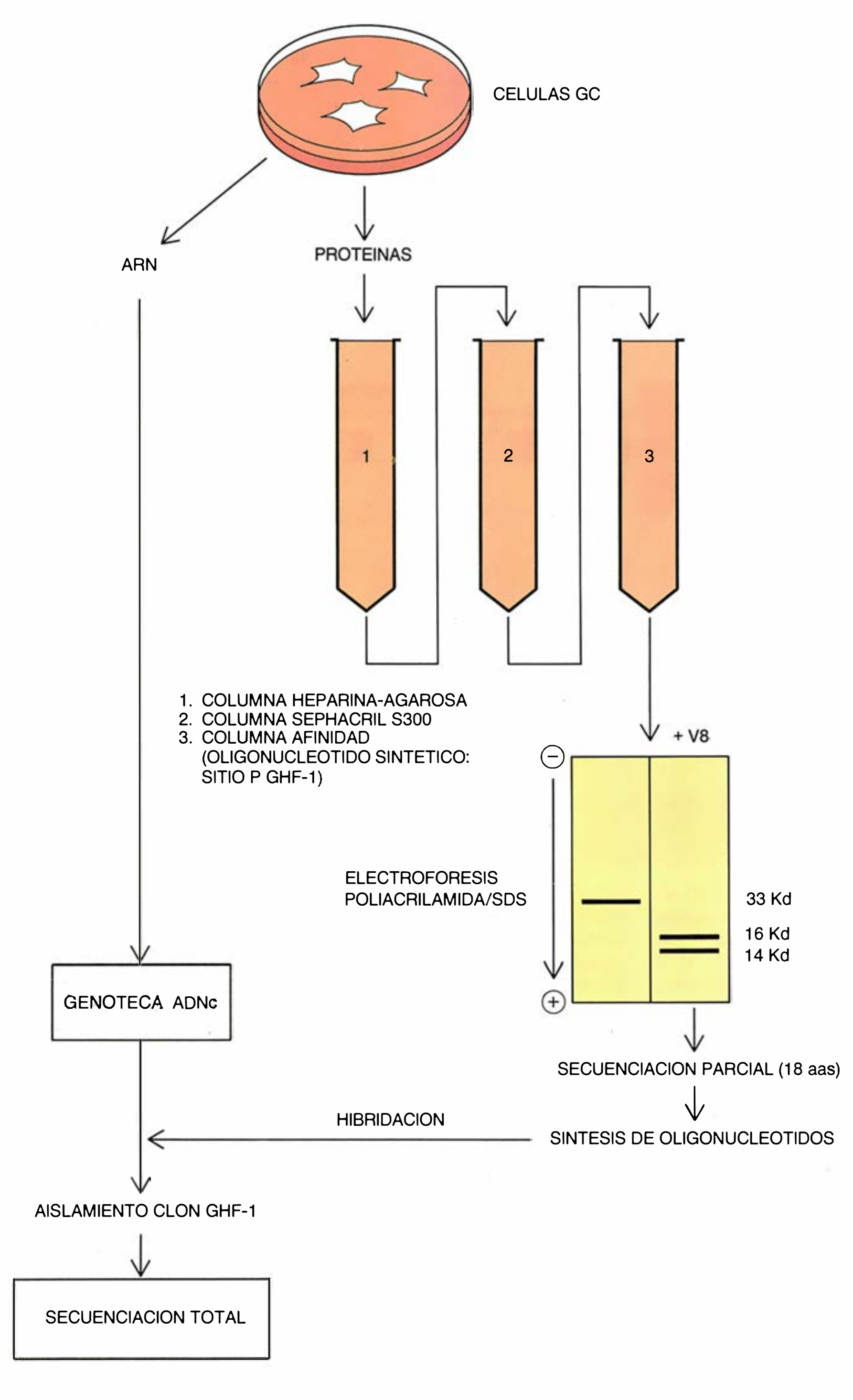
jo en diferentes tipos celulares y se midió la expresión de la proteína CAT. Resultó que sólo la líneas celulares procedentes de la pituitaria anterior (GC o GH3) presentaban actividad CAT. Ello permitió establecer un mecanismo de control positivo, según el cual en las líneas celulares de la pituitaria anterior había un factor de transcripción específico de tejido (denominado GHF-1) que, al unirse con el promotor *GH*, activaba la transcripción de éste. Las líneas celulares provenientes de otros tejidos (como las células fibroblásticas Rat-2 y NIH3T3), al no sintetizar esta proteína específica, no podían activar el promotor GH. La hipótesis del mecanismo de control se confirmó mediante experimentos de transcripción *in vitro* que empleaban extractos nucleares de diferentes líneas celulares.

En resumen, estos experimentos consistieron en sintetizar ARN en el tubo de ensayo, utilizando fracciones proteicas semipurificadas que contenían la maquinaria basal de transcripción celular: ARN pol II y factores de transcripción constitutivos, como TFIID. Sólo se observaba la transcripción del promotor GH, si se suplementaban esas fracciones con extractos nucleares procedentes de líneas celulares de la pituitaria anterior (GC o GH3).

A finales de 1987 no se había purificado ningún factor de transcripción específico de tejido en cuantía suficiente para poder determinar su secuencia de aminoácidos. El conocimiento de la estructura y del mecanismo de acción de estas proteínas nucleares que, en su interacción con el ADN, ejercen un papel regulador de la transcripción, se había demostrado imprescindible para avanzar en el estudio de la expresión específica de tejido. El estudio molecular de estos factores de transcripción nos permitirá conocer de qué modo se controla la expresión de los genes, cuándo deben expresarse tales genes durante la diferenciación embrionaria y qué genes son los responsables de la expresión específica de tejido.

Trabajando en colaboración con Mordechai Bodner, en el laboratorio de Michael Karin en la Universidad de California en San Diego, nos propusimos purificar, clonar y secuenciar la proteína responsable de la expresión específica del gen *GH*, el factor de transcripción GHF-1. Mediante extractos semipurificados provenientes de células GC (línea celular de rata originada a partir de un tumor de pituitaria anterior) y experimentos de protección del ADN en presencia de la enzima ADNasa I, se determinó la secuencia de nucleótidos de los sitios distal (D) y proximal (P) del promotor *GH*.

La técnica de "protección del ADN" consiste en mezclar en el tubo de ensayo extractos de proteínas y una región de ADN marcada radiactivamente. A continuación, esta mezcla proteína-ADN se incuba con la enzima ADNasa I, que corta la secuencia de ADN cuan larga es, salvo por las regiones donde están trabadas las proteínas. Tras purificar la fracción de ácidos nucleicos, se puede determinar qué secuencia de nucleótidos interacciona con la proteína, separando los



4. PURIFICACION DEL FACTOR DE TRANSCRIPCION GHF-1 a partir de cultivos de células GC (línea celular proveniente de un tumor de pituitaria anterior), mediante la extracción de proteínas y ARN mensajeros. Las proteínas que interaccionan con el ADN se purificaron a través de una primera columna de cromatografía de heparina-agarosa y se separaron, en razón de sus tamaños, en una segunda columna de Sephacril S-300. A continuación, la proteína GHF-1 se purificó mediante una columna de cromatografía de afinidad, preparada con oligonucleótidos sintéticos correspondientes al sitio P (proximal) del promotor GH. La proteína, con un peso molecular de 33 kilodaltons, se sometió a una digestión enzimática por parte de la proteasa V8 para liberar un extremo amino que no estuviera bloqueado y fuera susceptible de secuenciación. Los péptidos obtenidos con la digestión se separaron a través de electroforesis en gel de poliacrilamida en presencia de SDS, se transfirieron a papel de nitrocelulosa y se secuenciaron parcialmente. Se marcó con un isótopo radiactivo un oligonucleótido sintético cuya traducción correspondería al segmento de 18 aminoácidos secuenciado, oligonucleótido que se empleó de sonda para hibridar una genoteca de ADN complementario (ADNc) obtenida a partir de ARN mensajeros (ARNm) de células GC. Mediante este enfoque experimental se consiguió aislar el clon correspondiente al factor GHF-1 y se determinó la secuencia total de nucleótidos (ARNm) y de aminoácidos (proteína).

fragmentos cortados en un gel de poliacrilamida en condiciones desnaturalizantes, junto a un control que secuencia toda la región de ADN sujeta a ensayo. Los sitios proximal (P) y distal (D) del promotor de GH comparten una secuencia común: TAAAT. En general, y como se destacará más adelante, todos los factores de transcripción específicos de tejido actualmente caracterizados interactúan con secuencias de ADN que contienen un gran número de nucleótidos "AT".

Conocida la secuencia de nucleótidos protegida en el promotor del gen *GH*, diseñamos una columna de afinidad, que consistía en unir químicamente oligonucleótidos sintéticos correspondientes a la secuencia del sitio P, con la matriz inerte de la columna. En este tipo de columna, la proteína GHF-1 queda allí inicialmente retenida al interactuar de manera específica con el ADN; el resto de las proteínas con diferente especifidad se eluyen de la columna. Esta aproximación experimental nos permitió purificar el factor GHF-1 en cantidad suficiente como para secuenciar parcialmente 18 aminoácidos correspondientes a una región interna de la proteína.

Preparamos, a continuación, oligonucleótidos sintéticos cuya traducción correspondiera al segmento secuenciado de 18 aminoácidos. Mediante técnicas de ingeniería genética, se utilizaron de sonda para analizar una genoteca de ADN complementario (ADNc) obtenida a partir de ARNm de células GC. Una genoteca de ADNc consiste en una colección de plásmidos cuyos insertos de ADN constituyen clones de los ARNm transcritos en una célula. La genoteca de ADNc de células GC se transfirió a papel de nitrocelulosa y se hibridó con los oligonucleótidos sintéticos radiactivos diseñados tras la determinación de 18 aminoácidos de GHF-1. La utilización de estos oligonucleótidos como sondas nos permitió aislar el plásmido que contenía la secuencia total de ADNc correspondiente al ARNm de GHF-1 y, tras su secuenciación, deducir la secuencia total de aminoácidos del primer factor de transcripción específico de tejido.

El factor GHF-1 es una proteína compuesta por 291 aminoácidos con un peso molecular de 33 kilodaltons. Importa destacar que, en el extremo terminal carboxílico (C) de la proteína. se localiza el dominio homeobox (HB), una región de 60 aminoácidos homóloga a la existente en las proteínas "homeobox". Estas últimas son proteínas que presentan una secuencia de aminoácidos "conservada" (es decir, que ha persistido a lo largo de la evolución) e intervienen en la diferenciación embrionaria, aunque se desconoce el mecanismo molecular en virtud del

cual ejercen su función. Se ha puesto de manifiesto, en alguna ocasión, su capacidad de unión al ADN, pero se desconoce cuál es el gen o el promotor sobre el que interaccionan *in vivo*.

El descubrimiento de que el primer factor de transcripción específico de tejido clonado, GHF-1, sea una proteína homeobox ha hecho converger recientemente los campos de regulación de la transcripción y la genética del desarrollo. Una hipótesis formulada postula que, durante la diferenciación embrionaria, los genes que determinan factores de transcripción específicos de tejido se irían activando de una manera secuencial. Un factor dado reconocería secuencias específicas en diferentes promotores, algunos de los cuales regularían la transcripción de otros factores de transcripción, que a su vez reconocerían a continuación otros promotores que activarían la transcripción de otros genes. Mediante esta "cascada" de interacciones entre factor y promotor, se irían especializando secuencialmente los distintos tipos celulares de un organismo pluricelular.

Recientemente, se han purificado y secuenciado otros factores de transcripción específicos de tejido. El segundo factor de transcripción clonado fue *oct*-2, una proteína específica de linfocitos *B*, que presenta, asimismo, un dominio homeobox. Este factor se une al promotor de las inmunoglobulinas en el octámero, una región de ocho nucleótidos: ATGCAAAT. Cuando se comparó la secuencia de aminoácidos del factor GHF-1 con la del factor *oct*-2, se encontró una región de 75 aminoácidos, diferente de la homeobox, que compartía una homología del 65 por ciento. Región a la que se le ha dado el nombre de dominio POU, acrónimo éste formado por las iniciales de los tres primeros factores de transcripción específicos de tejido clonados: GHF-1(en *p*ituitaria anterior), *oct*-2 (*o*ctómero, en linfocitos *B*) y *unc*-86 (gen *u*nc-86 de *Clostridium elegans*). Esta nueva región ha ido apareciendo en todos los factores de transcripción específicos de tejido clonados hasta la fecha: *unc*-86, *oct*-3, *brain*-1, *brain*-2, *testis*-1 y CF1a. El dominio POU se encuentra situado junto al dominio HB, e incrementa la afinidad de la interacción entre el factor y el ADN favoreciendo la formación de un dímero de proteína.

Provocando mutaciones a lo largo de la secuencia de aminoácidos del factor GHF-1 y estudiando la transcripción del plásmido *p*GH-CAT en células HeLa, se ha caracterizado un nuevo dominio estructural. En el extremo terminal amino (N) de la proteína se encuentra el dominio OH (hidroxílico): una región con un 33 por ciento de aminoácidos entre serinas (S), treoninas (T), tirosinas (Y) y prolinas (P). Esta región STYP es la responsable de la activación de la transcripción y se asemeja a la repetición STYP que existe en la subunidad mayor de la enzima ARN polimerasa II.

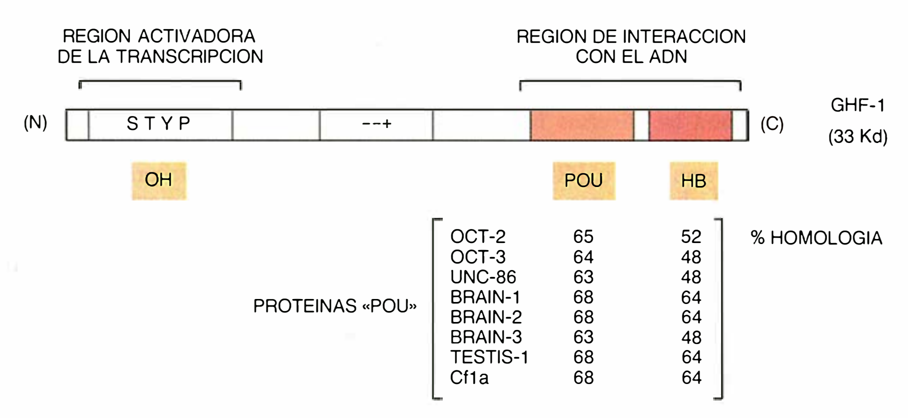
La purificación, clonaje y secuenciación de un mayor número de factores de transcripción constitutivos nos ha permitido establecer un modelo de activación de la ARN polimerasa II inducido por el factor GHF-1. La interacción entre factores de transcripción específicos de tejido (por ejemplo, GHF-1) y otros factores constitutivos (TFIIA, IIB, IID, IIE y IIF, es decir, factores de transcripción IIA, IIB, etc., poco caracterizados hasta la fecha) conduce a la formación de un complejo previo a la transcripción en el sitio de comienzo de la transcripción.

El dominio transactivador de GHF-1 (región STYP) interactúa con el factor de transcripción TFIID, la proteína que reconoce la secuencia TATA box. Este factor contiene una región que posee un gran número de glutaminas (QQQ), situada entre dos dominios STP (abundantes en los aminoácidos serina, treonina y prolina). El factor TFIID interactúa, a su vez, con los factores de transcripción IIA, IIB, IIE y IIF, así como con la ARN polimerasa II. La subunidad mayor de esta enzima, que presenta múltiples repeticiones de STYP, reconocería a dicho factor IID y a una hipotética proteína adaptadora, todavía por purificar. Por su parte, la proteína adaptadora reconocería los dominios STYP (susceptibles de fosforilación) y actuaría como un eslabón intermedio entre las diversas proteínas. Tras la formación del complejo previo a la transcripción, la actividad helicasa de la ARN polimerasa II separaría las dos cadenas de ADN y daría comienzo la síntesis de ARN. La purificación y secuenciación del factor de transcripción GHF-1 nos está permitiendo esclarecer el desarrollo molecular de la iniciación de la transcripción.

Para el estudio de la fisiología de esta proteína y su importancia biológica durante la diferenciación, nos hemos beneficiado muchísimo del desarrollo de anticuerpos específicos. Antes incluso de disponer de la secuencia completa de aminoácidos se obtuvieron anticuerpos inmunizando conejos con péptidos sintéticos unidos químicamente a albúmina bovina.

Los anticuerpos específicos contra GHF-1 se purificaron en una columna de afinidad, a la que se había unido químicamente el péptido sintético correspondiente a la secuencia de 18 aminoácidos de GHF-1. Los anticuerpos no específicos contra GHF-1 se eluyen de la columna, mientras que se retienen y purifican luego los anticuerpos específicos. La especificidad de estos anticuerpos se ensayó en líneas celulares de pituitaria (GC o GH3) mediante técnicas de inmunofluorescencia. Unicamente estas células presentaban GHF-1 en el núcleo.

El siguiente paso fue estudiar la dis-



	POU	HB
OCT-2	65	52
OCT-3	64	48
UNC-86	63	48
BRAIN-1	68	64
BRAIN-2	68	64
BRAIN-3	63	48
TESTIS-1	68	64
Cf1a	68	64

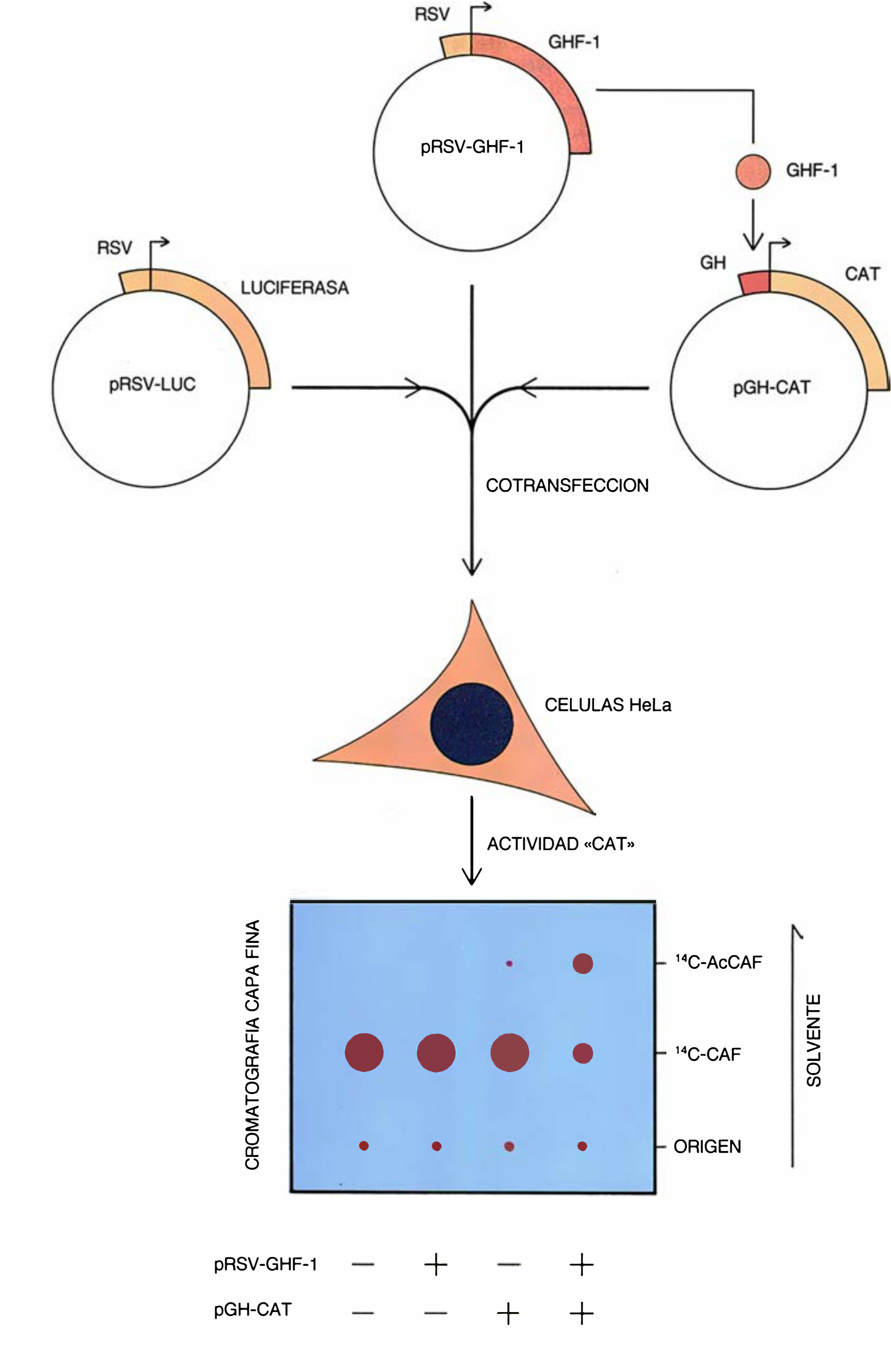
5. FACTOR DE TRANSCRIPCION ESPECIFICO DE TEJIDO GHF-1, una proteína compuesta por 291 aminoácidos y dotada de un peso molecular de 33 kilodaltons. Provocando mutaciones a lo largo de la secuencia de aminoácidos, se han podido caracterizar diversos dominios estructurales. En el extremo terminal amino (N), el dominio OH (hidroxílico) es una región con un gran número de serinas (S), treoninas (T), tirosinas (Y) y prolinas (P). Esta región presenta homología de secuencia con la subunidad mayor de la ARN polimerasa II y es la responsable de la activación de la transcripción. En el extremo terminal carboxilo (C) de la proteína, el dominio homeobox (HB) está constituido por una región de 60 aminoácidos, que se ha conservado, a lo largo de la evolución, en proteínas que intervienen en la diferenciación embrionaria. Esa región de aminoácidos interacciona específicamente con el ADN en los sitios proximal y distal del promotor GH. Recientemente, la purificación y secuenciación de un mayor número de factores de transcripción específicos de tejido (*oct*-2, *oct*-3, *unc*-86, *brain*-1, *brain*-2, *brain*-3, *testis*-1 y *Cf*1a) ha permitido caracterizar una región de 75 aminoácidos homóloga en todos ellos: el dominio POU. Esta región se encuentra situada junto al dominio HB y aumenta la afinidad de la interacción entre la proteína y el ADN, favoreciendo la formación de un dímero GHF-1/GHF-1. POU es un acrónimo formado por las iniciales de los tres primeros factores de transcripción específicos de tejidos clonados: *GAHF*-1 (*p*ituitaria), *oct*-2 (*o*ctámero) y *unc*-86 (gen *u*nc-86 de *Clostridium elegans*).

tribución de GHF-1 directamente en los diversos tipos celulares presentes en la pituitaria anterior, utilizándose anticuerpos contra las diversas hormonas hipofisarias. Sólo el núcleo de las células que secretan GH o PRL posee el factor GHF-1, lo que nos permitió proponer un mecanismo de acción de esta proteína en la diferenciación de la pituitaria anterior.

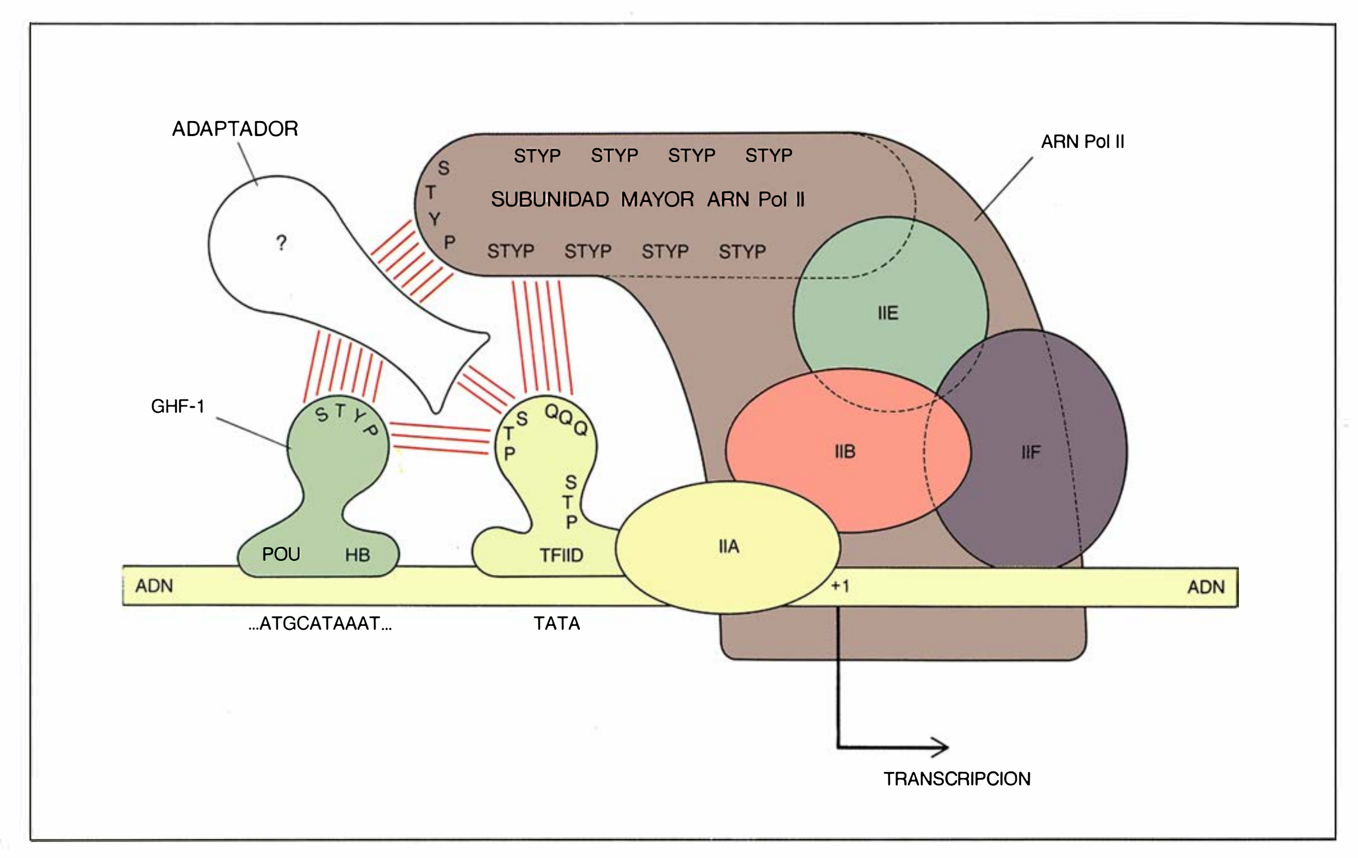
El modelo más reciente de diferenciación de la adenohipófisis postula que dos precursores celulares (acidófilos y basófilos) se generan a partir de una célula totipotente. Los basófilos son los precursores de las células que secretarán ACTH, TSH, FSH y LH. Los acidófilos son los precursores de las células que secretarán GH en primer lugar y PRL en una etapa posterior de la diferenciación. El 90 por ciento de las células que secretan PRL provienen de células precursoras GH, mientras que el 10 por ciento restante se originan a partir de precursores que no guardan relación con este tipo de células. De acuerdo con nuestro modelo, la aparición del factor de transcripción GHF-1 en los precursores acidófilos actuaría como una señal de diferenciación necesaria para la especialización en células productoras de GH. La diferenciación posterior de estas células en células productoras de PRL requeriría la existencia de un nuevo factor, PRLF-1 (factor 1 de la prolactina), que activaría específicamente la transcripción del gen de la prolactina al unirse a su promotor.

Para someter a prueba la validez del modelo que proponíamos, estudiamos la cinética de la aparición del factor GHF-1 durante la diferenciación de la pituitaria en embriones de ratón. Las concentraciones de ARN y de proteína GHF-1 son tan pequeñas durante esas fases de la diferenciación, que hubo que emplear técnicas de refinada sensibilidad: la reacción en cadena de la polimerasa (técnica RCP) para detectar el ARN y la técnica de tinción con anticuerpos conjugados con oro coloidal (para detectar la proteína GHF-1),

El empleo de la reacción en cadena de la polimerasa nos permitió detectar GHF-1 partiendo de sólo 0,1 microgramos de ARN total, extraído de embriones de ratón. Como iniciador de la polimerización dirigida por la enzima transcriptasa inversa, se empleó un oligonucleótido sintético complementario con la región homeobox del ARN de GHF-1. En virtud de la polimerización se forma un híbrido ARN:ADN. A continuación, se usaron dos nuevos oligonucleótidos correspondientes a regiones específicas de GHF-1 que sirvieron como iniciadores para la reacción de polimerización en cadena. La enzima *Taq*-1, muy estable, sirve para polimerizar ADN a 72 grados C. Esta característica le convierte en un reactivo ideal para la automatización y repetición indefinida de la reacción. La temperatura, el tiempo y el número de



6. ACTIVACION DE LA TRANSCRIPCION por el factor GHF-1, analizada experimentalmente mediante la transferencia simultánea de tres plásmidos al interior de células que no expresan la hormona del crecimiento (GH). El primer plásmido, *p*RSV-GHF-1, es un vector de expresión de la proteína GHF-1 bajo el control del promotor del virus del sarcoma de Rous (RSV), un promotor no específico de tejido. El segundo plásmido, *p*GH-CAT, sintetiza la enzima bacteriana cloramfenicol-acetil-transferasa (CAT) bajo el control del promotor GH. El tercer plásmido, *p*RSV-Luc, es un vector de expresión de la enzima luciferasa; se emplea como control interno del rendimiento de la transfección del ADN. Si en las células HeLa penetra sólo el plásmido *p*GH-CAT, al no disponer éstas del factor de transcripción específico de tejido GHF-1, el promotor quedará inactivado y no habrá síntesis de la enzima CAT. Pero si a las células se transfieren conjuntamente los plásmidos *p*RSV-GHF-1 y GH-CAT, las células Hela expresarán el factor GHF-1, que se unirá en posición "trans" al promotor GH del plásmido *p*GH-CAT, activando la transcripción y la síntesis de la enzima CAT. En el laboratorio se puede analizar fácilmente la actividad de esta enzima mediante la reacción de acetilación del cloramfenicol marcado radiactivamente con carbono 14 (^{14}C-CAF). El compuesto acetilado (^{14}C-AcCAF) se separa mediante cromatografía en capa fina y se detecta tras la exposición de una película fotográfica.



7. MODELO DE ACTIVACION de la transcripción por el factor GHF-1. La interacción entre factores de transcripción específicos de tejidos (GHF-1) y otros factores constitutivos en el núcleo de todas las células eucarióticas (TFIIA, TFIIB, TFIID, TFIIE y TFIIF) da lugar a la formación de un complejo previo a la transcripción en el sitio de iniciación de la transcripción (+1). El dominio transactivador de GHF-1 (región rica en serinas, treoninas, tirosinas y prolinas: STYP) interacciona con el factor de transcripción TFIID, la proteína que se une a la secuencia "TATA box". Este factor contiene una región con un gran número de glutaminas (QQQ), situada entre dos dominios STP (abundantes en serinas, treoninas y prolinas). El factor TFIID interacciona, a su vez, con los factores de transcripción IIA, IIB, IIE, IIF y con la ARN polimerasa II. La subunidad mayor de esta enzima (que posee múltiples repeticiones STYP) reconocería la región QQQ del factor de transcripción IID y de una proteína "adaptadora" sin purificar todavía. Tal proteína adaptadora reconocería los dominios STYP de los factores de transcripción y actuaría a modo de eslabón entre las distintas proteínas. Tras la formación del complejo previo a la transcripción, la actividad helicasa de la ARN polimerasa II separaría las dos cadenas de ADN, y comenzaría la síntesis de ARN. (No se ilustra la doble hélice de ADN, ni la modificación de la conformación de la cromatina.)

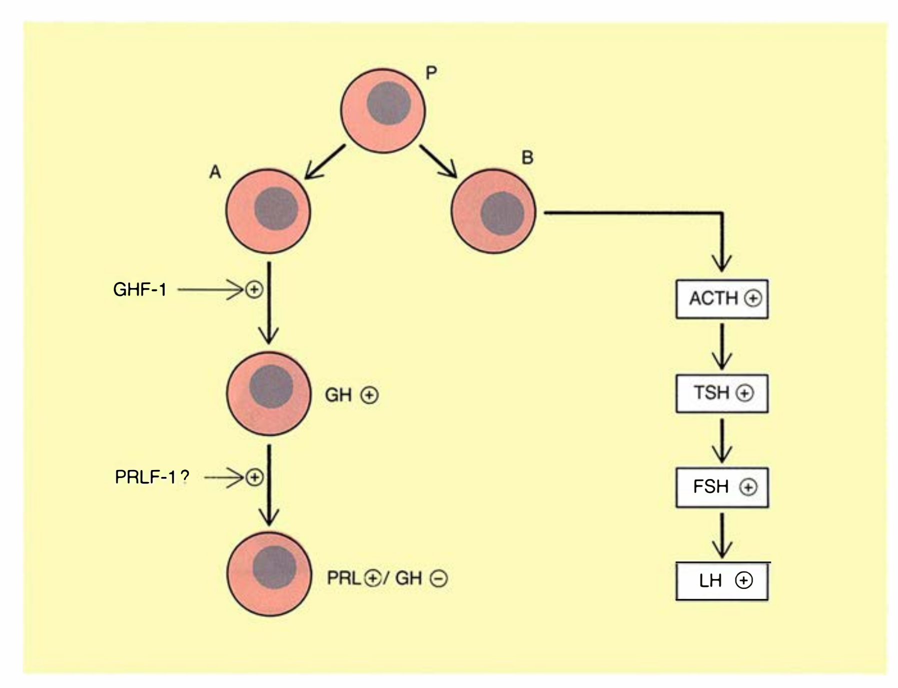
ciclos se programan en una máquina termostática. En cada ciclo el ADN se desnaturaliza a 93 grados C, los oligonucleótidos se hibridan a 55 grados C y el ADN se polimeriza a 72 grados C. Cada etapa tiene una duración de un minuto, repitiéndose entre 45 y 60 ciclos. Por último, el ADN sintetizado se separa mediante electroforesis en un gel de agarosa.

La utilización de oligonucleótidos sintéticos específicos de GHF-1 y de polimerasa bacteriana termoestable, *Taq*-1, posibilitó su detección desde el décimotercer día de gestación del ratón. Entre los días 14 y 16 se alcanza un máximo de expresión de ARN de GHF-1 y, a partir del día 17, los niveles de ARN disminuyen, alcanzándose un nivel basal semejante al del adulto. Idénticos resultados se obtuvieron con técnicas de hibridación *in situ*: el ARN codificador del GHF-1 se empieza a transcribir a partir del día 13 específicamente en la pituitaria anterior. Ningún otro tejido, ni siquiera temporalmente, expresa GHF-1 durante la diferenciación embrionaria de ratón.

Sirviéndonos de anticuerpos específicos contra GHF-1 y de la tinción con anticuerpos conjugados con oro coloidal, estudiamos, asimismo, la cinética de aparición de la proteína GHF-1 en embriones de ratón. Para ello, comenzamos por preparar cortes seriados de embriones de ratón a diferentes tiempos de gestación. A continuación, se incubaron las preparaciones en los pasos siguientes: primero, el anticuerpo específico anti-GHF-1 purificado a partir de sueros de conejos inmunizados con GHF-1; segundo, un anticuerpo específico de inmunoglobulinas de conejo conjugado con oro coloidal; tercero, se emplea el intensificador de plata. Esta última etapa permite la visualización del complejo antígeno-anticuerpo con una sensibilidad superior a la técnica de inmunofluorescencia, gracias a la formación de un precipitado marrón.

Para nuestra sorpresa, la proteína GHF-1 se expresaba a partir del día 15 de desarrollo embrionario. ¿Por qué el ARN de GHF-1 no se traduce en proteína entre los días 13 y 15? Se han propuesto diversos mecanismos de regulación posteriores a la transcripción para explicar ese desfase: inhibición del transporte núcleo-citoplasma, del procesamiento del ARN o directamente de la iniciación de la síntesis de proteínas. La respuesta al interrogante requerirá establecer cultivos primarios de células en los diversos estadios de diferenciación de la pituitaria.

De los estudios cinéticos realizados, hay que destacar dos hechos. Primero, la aparición de la proteína GHF-1 en la célula coincide con la síntesis tanto de ARN como de proteína GH; este resultado apoya la consideración de GHF-1 como un factor de transcripción específico del promotor GH. Segundo, a pesar de la elevada concentración de proteína GHF-1 existente desde el día 15 de gestación, la síntesis de ARN y proteína prolactina no se detecta hasta cinco o seis días después. Este desfase temporal concuerda con nuestro modelo que postula la existencia de un segundo factor PRLF-1 necesario para activar la transcripción del gen de la prolactina y para bloquear la transcripción del gen GH en células que secreten exclusivamente prolactina.

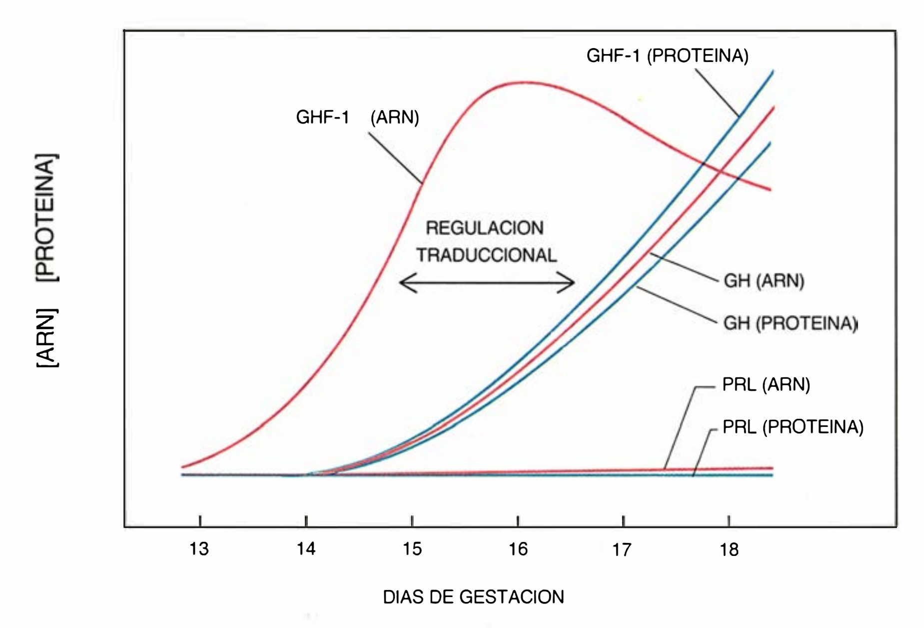


8. DIFERENCIACION de las células de la pituitaria inferior. Se inicia a partir de una célula precursora (P), que da origen a dos grandes grupos celulares: células acidófilas (A) y células basófilas (B). Las células basófilas son las precursoras de las células que sintetizarán ACTH, TSH, FSH y LH. Las células acidófilas originarán células productoras de hormona del crecimiento (GH), tras la síntesis del factor GHF-1. Las células que segregan prolactina (PRL) se originan de las células GH. Se ha postulado que la síntesis de un segundo factor de transcripción (PRLF-1) en estas células activaría el promotor PRL, al tiempo que inhibiría el promotor GH.

Algunos de los interrogantes más apasionantes están todavía pendientes de respuesta: ¿Por qué el gen GHF-1 se expresa en el día 13 y no con anterioridad? Si el factor GHF-1 controla específicamente la expresión del gen GH, ¿quién controla la expresión del gen GHF-1? Las respuestas a estas preguntas se irán probablemente esclareciendo según vayamos identificando los factores de transcripción que reconocen el promotor del gen GHF-1.

Para no acabar en una cascada infinita de factores de transcripción específicos que controlan promotores, que a su vez controlen otros promotores, se han propuesto modelos basados en la interacción combinatoria de diversos factores de transcripción. Según estos modelos, bastaría con un número limitado de factores de transcripción para controlar la diferenciación y especialización del conjunto de tipos celulares de un organismo. Por ejemplo, la existencia de dos factores de transcripción específicos de tejido (A y B) y de otros dos factores constitutivos (C y D) regulados por la presencia de hormonas (piénsese en los receptores de glucocorticoides y ácido retinoico) permitiría la interacción combinatoria sobre quince promotores diferentes de estos cuatro factores (A, B, C, D; A+B, C+D, A+C, etc.; A+B+C+D, etc.), capaz de regular hasta quince genes distintos.

En conclusión, la purificación y secuenciación de un factor de transcripción específico de tejido, GHF-1, nos están permitiendo estudiar cómo tiene lugar la regulación molecular de la síntesis de ARN y de qué forma las células eucarióticas se especializan durante la diferenciación de un organismo pluricelular. El clonaje de un mayor número de estos factores de transcripción específicos de tejido nos va a permitir conocer con mayor detalle la interacción entre las diversas piezas de ese fascinante rompecabezas bioquímico que somos cada uno de nosotros.



9. CINETICAS DE SINTESIS DE ARN Y PROTEINAS entre los días 13 y 18 de gestación embrionaria de ratón. Los niveles de ARN se determinaron mediante hibridación *in situ*, utilizando ARN complementarios al ARN de GHF-1, GH o PRL, marcados radiactivamente. Se determinaron los niveles de proteína utilizando anticuerpos conjugados con oro coloidal e intensificados con plata. Se observa la correlación existente entre la síntesis de ARN de GH y la síntesis de proteína GHF-1. Hay, sin embargo, un desfase de dos o tres días entre la síntesis del ARN de GHF-1 y la aparición de la proteína GHF-1, lo que sugiere un mecanismo de regulación de la traducción.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE PITUITARY SPECIFIC TRANSCRIPTION FACTOR GHF-I IS A HOMEOBOX CONTAINING PROTEIN. M. Bodner, J. L. Castrillo, L. E. Theill, T. Deerinck, M. Ellisman y M. Karin en *Cell*, vol. 55, n.º 3, págs. 505-518; 1988.

PURIFICATION AND CHARACTERIZATION OF THE PITUITARY-SPECIFIC TRANSCRIPTION FACTOR, GHF-I. J. L. Castrillo, M. Bodner y M. Karin en *Science*, vol. 243, n.º 4892, págs. 814-818; 1989.

CLONING OF THE HUMAN GROWTH-HORMONE FACTOR I, GHF-I. J. L. Castrillo, L. E. Theill, M. Bodner y M. Karin en *Gene regulation by steroid hormones IV*, dirigido por A. K. Roy y J. Clark. Springer Verlag; Nueva York, págs. 90-107; 1989.

DISSECTION OF FUNCTIONAL DOMAINS OF THE PITUITARY-SPECIFIC TRANSCRIPTION FACTOR GHF-I. L. E. Theill, J. L. Castrillo, D. Wu y M. Karin en *Nature*, vol. 342, n.º 6252, págs, 945-948; 1989.

GROWTH HORMONE GENE REGULATION: A PARADIGM FOR CELL-TYPE SPECIFIC GENE ACTIVATION. M. Karin, J. L. Castrillo y L. E. Theill en *TIG*; vol. 63, n.º 6, págs. 92-96; 1990.

FUNCTION OF THE HOMEODOMAIN PROTEIN GHF-I IN PITUITARY CELL PROLIFERATION. J. L. Castrillo, L. E. Theill y M. Karin en *Science*, vol. 253, n.º 5016, págs. 197-199; 1991.

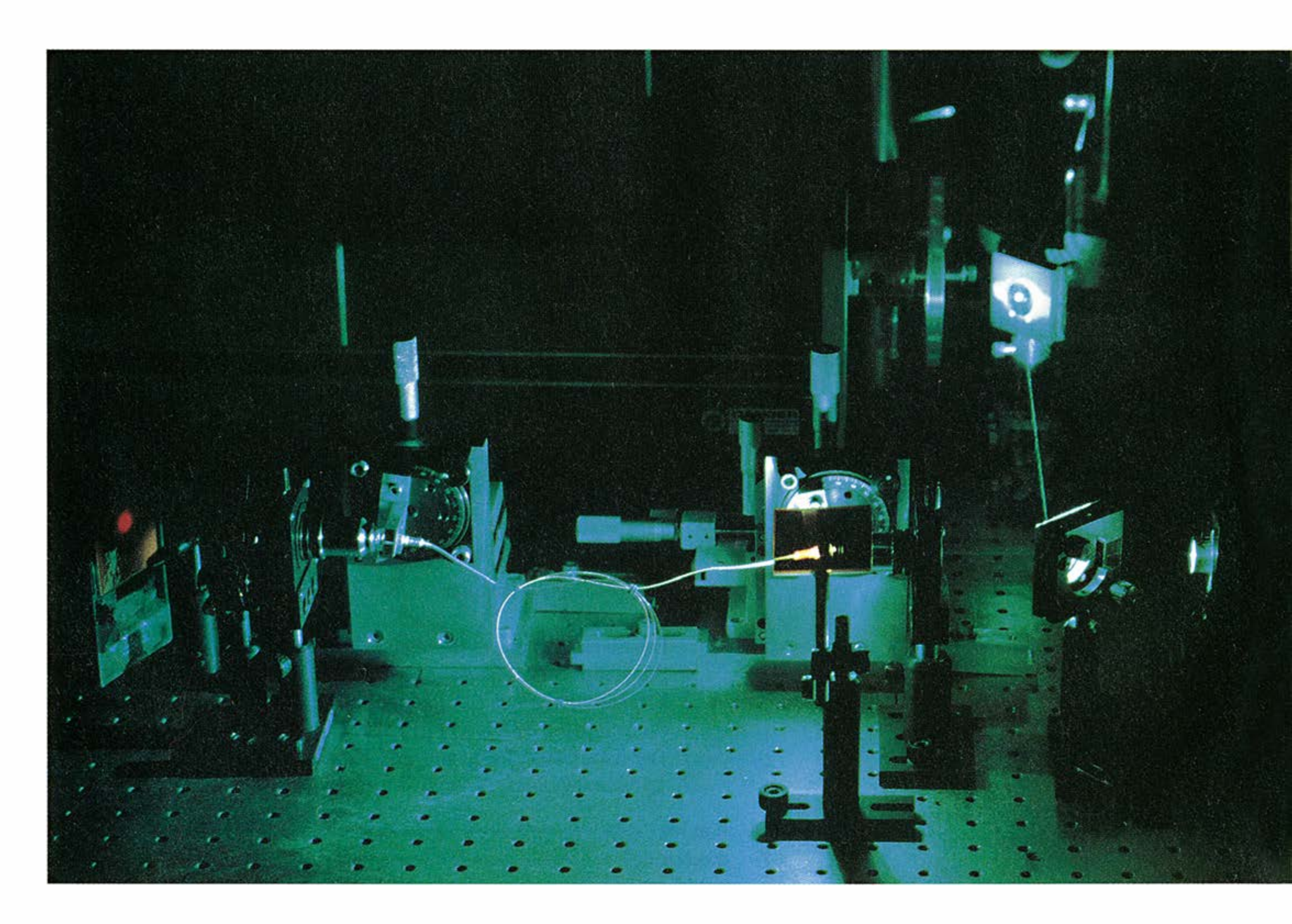
Comunicaciones ópticas: la quinta generación

Las fibras ópticas dopadas con erbio y excitadas por pastillas de láser están revolucionando la regeneración de las señales utilizadas en las comunicaciones intercontinentales y en la transmisión rápida de datos a través de redes

Emmanuel Desurvire

Las innovaciones surgen a veces cuando las tecnologías existentes o las viejas ideas se aplican de una forma original o no convencional. Hace unos cinco años muchos científicos afirmaron que los sistemas de comunicaciones por ondas luminosas (comunicaciones ópticas) estaban acercándose al límite de sus posibilidades. Haciendo caso omiso de tales opiniones, un equipo de investigadores sometió a nuevo examen una tecnología que ha cumplido ya los veinte años: las fibras ópticas fabricadas con vidrio de sílice y trazas de un elemento de la familia de las tierras raras. Estas fibras amplifican las señales luminosas cuando se las alimenta con radiación infrarroja.

Al cabo de tres años de trabajo, el grupo en cuestión, al que yo pertenecía, había conseguido desarrollar un nuevo tipo de amplificador óptico basado en una fibra dopada (contaminada) con el elemento de tierra rara erbio, y alimentado por una fuente de radiación, diminuta pero de alto rendimiento, que se denomina pastilla ("chip") de diodo láser. La integración de este amplificador de fibra óptica en sistemas de comunicaciones centuplicó la capacidad de transmisión de tales sistemas. En principio, se pueden transmitir miles de millones de bits de información en una fracción de segundo por un cable continuo que recorra



un cuadrante de meridiano terrestre. A mediados de esta década, los laboratorios AT&T Bell y la empresa Kokusai Denshin Denwa (KDD) proyectan tender un cable similar a través del océano Pacífico, y es probable que muchas otras compañías hagan lo mismo. Cada uno de estos cables permitirá transmitir simultáneamente 500.000 llamadas telefónicas, más de 12 veces la capacidad de los sistemas transoceánicos que actualmente existen.

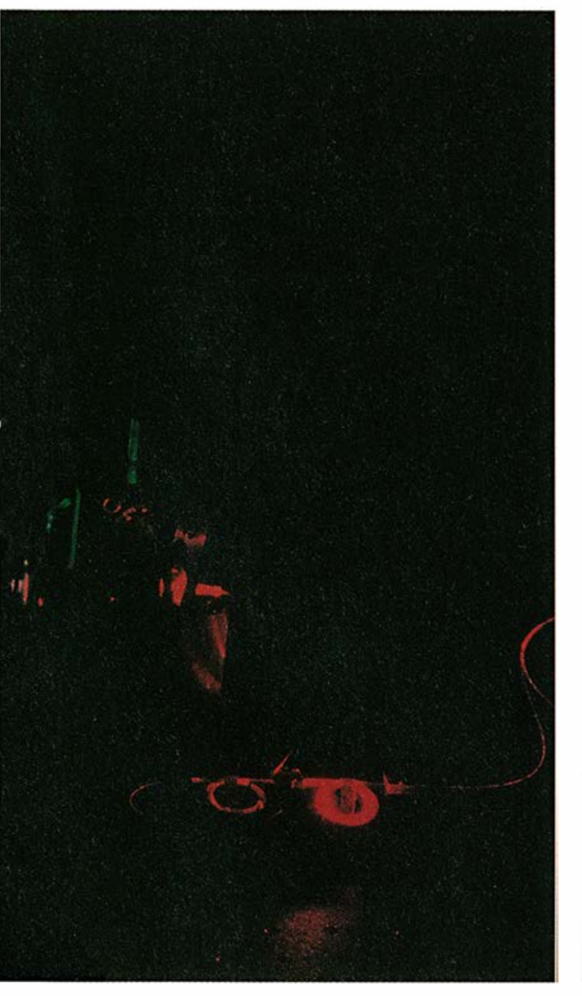
Las fibras dopadas con erbio suprimen la necesidad de los repetidores, unos dispositivos complejos que en los sistemas convencionales se utilizan para regenerar las señales debilitadas. Los amplificadores de fibra óptica pueden intensificar el nivel de las señales en una proporción mucho mayor que los repetidores y están capacitados para transmitir datos a velocidades más elevadas.

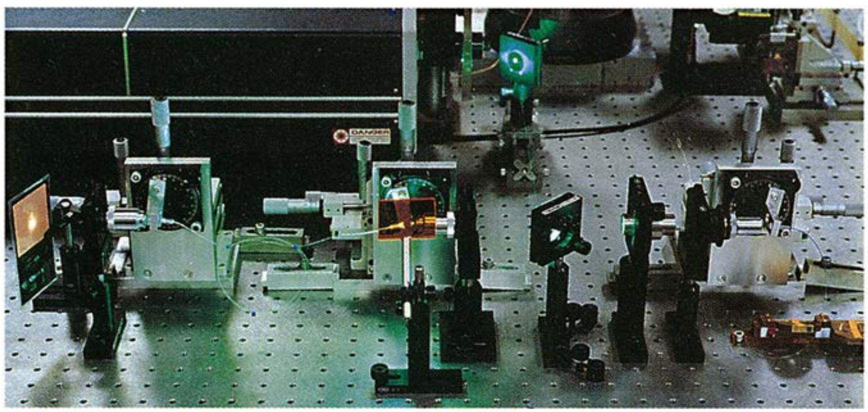
Los amplificadores de fibra contaminada con erbio desempeñarán un papel muy destacado, no sólo en las comunicaciones a larga distancia sino también en las redes de área local. El uso de estos amplificadores resulta sumamente indicado en las redes que transportan enormes cantidades de información a miles de usuarios, redes que podrían servir para llevar la televisión de alta definición y las conferencias por vídeo a todos los hogares y las empresas.

Los amplificadores de fibra deberían también ser parte integrante de los sistemas de comunicaciones futuras. Así, podrían tales dispositivos incorporarse a sistemas que transporten información expresada por cambio en la fase y la frecuencia de la luz, y no por modulación de la intensidad como los sistemas actuales. También pueden ser muy valiosos los amplificadores de fibra en sistemas en los que la información va contenida en impulsos luminosos de corta duración denominados solitones, que en teoría se pueden propagar indefinidamente a lo largo de una fibra óptica sin defectos. Si de cualquiera de estos conceptos surgiera un sistema de utilidad práctica, sus prestaciones superarían en mucho las de los sistemas que hoy existen.

A partir del año 1975, la tecnología de las comunicaciones ópticas ha avanzado a un ritmo extremadamente rápido, desde todos los puntos de vista; ha evolucionado a medida que los científicos perseveraban en su empeño de inventar sistemas capaces de transmitir más cantidad de información, a velocidades más elevadas y hasta mayores distancias. Los sistemas innovadores deben además demostrar que son prácticos y económicos. A lo largo de los últimos 20 años, los investigadores han desarrollado cinco generaciones diferentes de sistemas de comunicaciones ópticas, cada una de las cuales ha supuesto un avance muy importante en la tecnología.

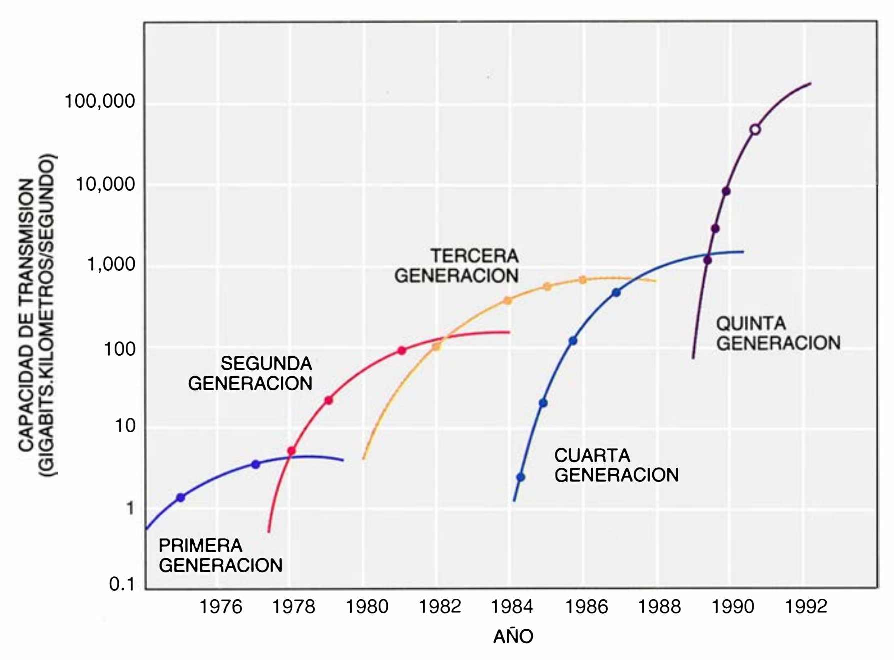
Cuando en 1975 se introdujo la primera generación de los sistemas de comunicaciones por ondas luminosas, se encontró que su capacidad de transporte de información era mucho mayor que la de los sistemas de transmisión de señales eléctricas por cables de cobre. Los sistemas de la primera generación y los que les siguieron estaban constituidos por los mismos componentes básicos: unos dispositivos de codificación y decodificación, un transmisor, unas fibras de sílice, unos repetidores y un receptor. En primer lugar, el dispositivo de codificación convierte la información en señal eléctrica; a continuación, el transmisor convierte la señal en luz. El transmisor, al menos en 1975, era un diodo fotoemisor que producía radiación infrarroja en una longitud de onda de





1. FIBRA OPTICA DOPADA CON ERBIO (la espira de color verde que aparece en la fotografía de la izquierda). Será uno de los componentes esenciales de la próxima generación de sistemas de comunicaciones ópticas. Para demostrar las posibilidades de esta fibra como amplificador, el autor y su grupo de los laboraotorios AT&T Bell construyeron el aparato aquí reproducido a plena luz (*arriba*) y en la oscuridad (*izquierda*). La fibra amplifica las señales de luz infrarroja cuando se la excita con luz verde de láser. Los átomos de erbio presentes en la fibra absorben la luz verde y saltan a un estado de alta energía. Cuando una señal de luz infrarroja atraviesa la fibra, los átomos de erbio le transfieren su energía siguiendo el proceso de emisión estimulada. Se utiliza luz roja para indicar el recorrido de la señal: ésta avanza desde la derecha del aparato, se propaga por la fibra dopada con erbio y emerge por la izquierda, donde se mide su amplificación.

EMMANUEL DESURVIRE enseña ingeniería eléctrica en la Universidad de Columbia, en cuyo centro de investigación de las telecomunicaciones trabaja. Tras dos años dedicado al estudio de los amplificadores de fibra Raman en la Thomson-CSF de Orsay, se doctoró en la Universidad de Niza. Pasó los dos años siguientes en la de Stanford, dirigiendo la investigación sobre dispositivos de fibra activos. Desde 1986 hasta 1990 trabajó en los laboratorios AT&T Bell sobre amplificadores de fibra contaminada con erbio.



2. LA CAPACIDAD DE TRANSMISION de las fibras ópticas se ha multiplicado por diez cada cuatro años desde 1975. En esta figura se muestran las cinco generaciones de esta tecnología. La curva de color púrpura representa los resultados de una experiencia que simulaba transmisiones a grandes distancias mediante un bucle de fibras ópticas y amplificadores de fibra.

0,87 micrometros; los diodos responden a los cambios que experimenta la señal eléctrica emitiendo luz con intensidades diferentes.

En todas las generaciones de sistemas de comunicaciones ópticas, la luz procedente del transmisor se propaga a través de fibras fabricadas con vidrio de sílice. La fibra consta de un núcleo, que transporta la luz, y un revestimiento, que actúa como guía de la luz a lo largo del núcleo. Cuando una señal luminosa se propaga por la fibra, dicha señal se ensancha y se debilita. La dispersión de la señal se debe, en parte, a las diferentes velocidades con que se propagan por el núcleo las radiaciones de distinta frecuencia. En gran medida, la atenuación de la señal proviene de que los defectos o impurezas del vidrio absorben o difunden la luz.

La atenuación de un sistema puede compensarse con repetidores, que son dispositivos instalados entre sucesivos tramos de la fibra con el fin de detectar, amplificar y reemitir la señal. Al final del trayecto, la señal llega al receptor, que transforma la luz y la restituye a señal eléctrica. En último término, el dispositivo decodificador traduce las señales eléctricas a una forma que pueda interpretar un teléfono o un ordenador.

El éxito de cada una de las generaciones sucesivas de sistemas de comunicación óptica ha dependido en última instancia de dos magnitudes: la cantidad de información que el sistema es capaz de transmitir en un segundo y la distancia máxima que pueden recorrer las señales por el interior de la fibra sin necesidad de ser regeneradas. En consecuencia, los logros de un sistema pueden cifrarse en la capacidad de transmisión, magnitud que equivale al producto de la más alta velocidad binaria (bits/segundo) admitida por el máximo alcance de la transmisión. Allá por 1978, se podían transmitir unos mil millones de bits (1 gigabit) por segundo a través de un sistema de 10 kilómetros de alcance. En otras palabras, la capacidad de transmisión era del orden de 10 gigabits.kilómetros/segundo.

Tres años después de dicha fecha, cuando apareció la segunda generación, la capacidad de transmisión de los sistemas de comunicaciones por ondas luminosas alcanzó valores próximos a los 100 gigabits.kilómetros/segundo, y ello se debía a una doble mejora técnica. En primer lugar, reduciendo el tamaño del núcleo de la fibra se crearon las llamadas "fibras monomodo", que fuerzan a las señales luminosas a viajar con velocidad prácticamente uniforme: en ellas disminuyó enormemente la dispersión. En segundo lugar, se desarrollaron transmisores y receptores capaces de trabajar con luz de longitud de onda de 1,3 micrometros. Este cambio consiguió reducir la atenuación, dado que el vidrio de sílice es más transparente para la longitud de onda de 1,3 micrometros que para la de 0,87 micrometros.

En 1982 comenzó a insinuarse la tercera generación, a medida que los investigadores desarrollaban técnicas para obtener vidrios de sílice de pureza cada vez mayor. Al hacerlo así, los científicos consiguieron una gran mejora en la transparencia de las fibras en la gama de longitudes de onda comprendida entre 1,2 y 1,6 micrometros. Para aprovecharse de este avance, perfeccionaron la tecnología de la pastilla de láser de diodo, una fuente de luz lasérica y monocromática de alta velocidad. En particular, los láseres de diodo podían producir luz de 1,55 micrometros, longitud de onda para la cual el vidrio de sílice alcanza su máxima transparencia. Todos estos progresos elevaron la capacidad de transmisión de estos sistemas hasta los centenares de gigabits.kilómetros/segundo.

Hacia 1984, muchos investigadores creían que el diseño básico de los sistemas de comunicaciones ópticas había alcanzado ya su término. Ante su sorpresa, surgieron la cuarta y la quinta generaciones de estos sistemas, fruto del trabajo de una comunidad de científicos que se afanaba por iniciar nuevos desarrollos y conseguir dispositivos todavía más avanzados.

La cuarta generación comprende unos sistemas innovadores en los que se modula la frecuencia o la fase de la luz en lugar de su intensidad. Dado que estos sistemas preservan la fase y la frecuencia de la radiación de luz, se les denomina sistemas coherentes, término que también se utiliza para denominar a las ondas luminosas que se propagan conjuntamente con la misma fase y frecuencia. Los sistemas basados en la modulación de intensidad se llaman de detección directa, puesto que los detectores utilizados en tales sistemas pueden traducir directamente un cambio de la intensidad en una fluctuación de la corriente eléctrica.

En el laboratorio, los sistemas coherentes aventajan en prestaciones a los sistemas de detección directa. En efecto, los receptores coherentes son capaces de detectar con precisión señales luminosas cuya intensidad es muy inferior al valor mínimo que pueden discernir los sistemas de detección directa; por consiguiente, las señales alcanzan distancias a través de un sistema coherente mucho mayores que a través de un sistema de detección directa comparable.

Hacia 1987, las capacidades de transmisión de los sistemas coherentes eran casi tan elevadas como en los sistemas de detección directa. Sin embargo, no se sabía muy bien si alguno de estos tipos de sistema podría mejorarse. Aunque hubo quienes se inclinaban hacia los sistemas coherentes debido a sus mayores posibilidades, debían abordar serios obstáculos de carácter técnico. El primero, que era

necesario fabricar fuentes luminosas de frecuencia y fase muy estables, y el segundo, que los dispositivos a desarrollar debían ser capaces de modular y detectar la fase y la frecuencia de la luz con la misma facilidad con que los componentes convencionales podían variar y controlar la intensidad de la radiación correspondiente. En realidad, los investigadores habían ya obtenido dispositivos que satisfacían estos requisitos, pero en aquellos tiempos los métodos utilizados eran demasiado complicados y costosos para los usos prácticos.

Los expertos se esforzaban también en mejorar los sistemas de detección directa. Eran conscientes de que unos nuevos amplificadores, más potentes, podrían compensar la limitada sensibilidad de los sistemas de detección directa, ya que dichos amplificadores intensificarían las señales y éstas podrían propagarse a distancias mucho mayores.

Había grupos empeñados en la construcción de un amplificador óptico en una sola pastilla, objetivo que se logró aunque surgieron dificultades para hacer funcionar estos dispositivos en mesas de laboratorio. No era fácil imaginar que las pastillas de amplificadores ópticos llegaran a utilizarse en gran escala al cabo de varios años.

A finales de los ochenta, parecía probable que tanto los sistemas de detección directa como los sistemas coherentes podrían sacar algún provecho de los amplificadores ópticos. Pero se ignoraba qué tipo de amplificador sería el mejor; por ello algunos dirigieron su atención hacia ciertos dispositivos "exóticos".

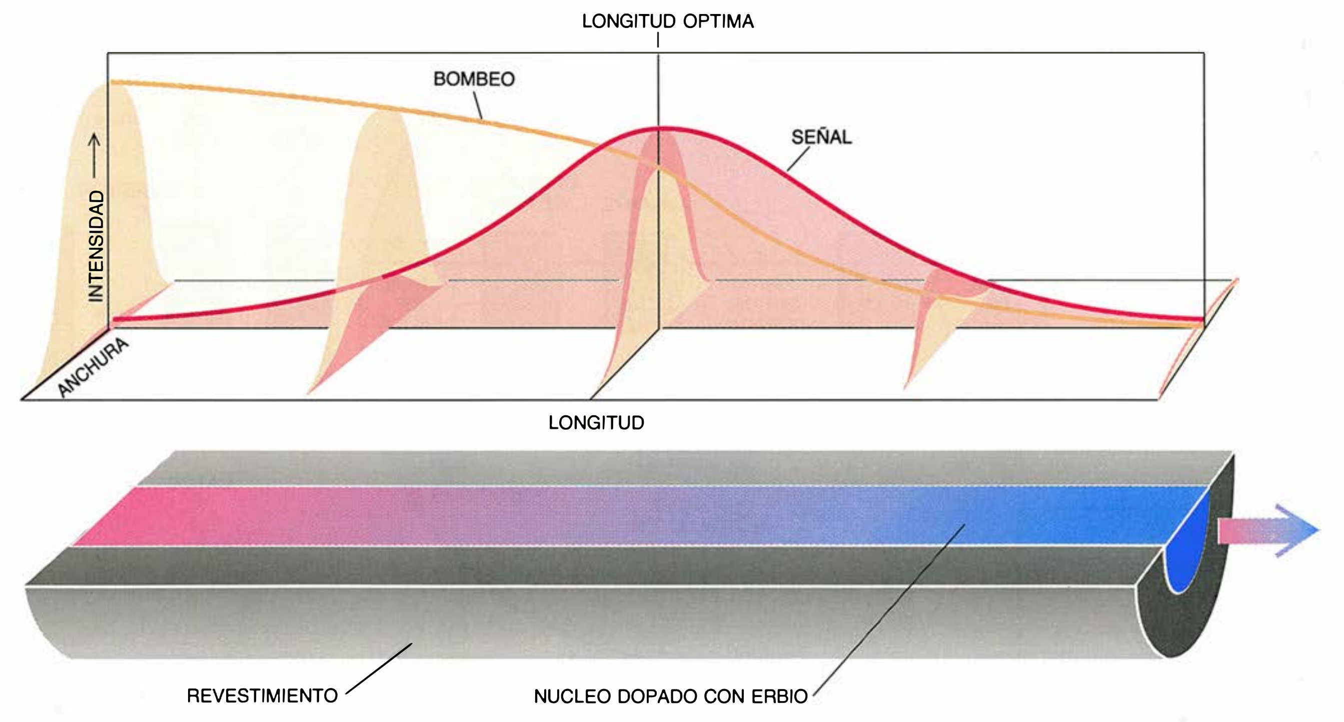
El avance decisivo consistió en el desarrollo de un amplificador de fibra óptica dopada con erbio, que esencialmente se compone de diodos láser y secciones de la citada fibra óptica. Los diodos láser excitan el amplificador, suministrándole una radiación infrarroja en longitud de onda de 1,48 o 0,98 micrometros. Los átomos de erbio absorben la luz, y esto les excita y "bombea" hacia un nivel de alta energía. Al entrar una señal debilitada en la fibra dopada, dichos átomos de erbio "excitados" le transfieren su energía a través de un proceso que Einstein denominó emisión estimulada. De esta manera, la fibra contaminada con erbio regenera la señal.

Aunque actúan como regeneradoras de la señal, las fibras dopadas con erbio no son consideradas "repetidores"; en efecto, los repetidores convierten la luz en corriente eléctrica, amplifican dicha corriente y la transforman nuevamente en luz. Estas fibras ópticas no interrumpen la trayectoria de la señal luminosa en su propagación desde el transmisor hasta el receptor.

La introducción de las fibras dopadas con erbio ha marcado la aparición de la quinta generación de los sistemas de comunicaciones ópticas, con la que las capacidades de transmisión se dispararon desde centenares hasta decenas de miles de gigabits.kilómetros/segundo.

La idea de contaminar las fibras ópticas con erbio y otros elementos de las tierras raras data de principios de las década de los sesenta, cuando Charles J. Koester y Elias Snitzer, de la compañía American Optical, investigaron las propiedades de las fibras ópticas dopadas con otro elemento de las tierras raras, el neodimio. Descubrieron que dichas fibras podían dar soporte al efecto láser y amplificar la luz. Para medir la amplificación obtenida se enrolló un trozo de fibra de un metro de longitud en torno de una lámpara de destellos; observaron entonces que la radiación infrarroja de 1,06 micrometros de longitud de onda podía ser amplificada en un factor de 50.000, equivalente a una ganancia de 47 decibelios. (En general, la amplificación se suele expresar en decibelios, en cantidad igual a diez veces el valor del logaritmo decimal de la relación entre la potencia de salida y la potencia de entrada.) Diez años después, Julian Stone y Charles A. Burrus, Jr., de los laboratorios Bell, demostraron que las fibras dopadas con neodimio podían ser excitadas por diodos láser en lugar de las engorrosas lámparas de destellos o los láseres refrigerados con agua.

Sin embargo, durante los años setenta se abandonó totalmente esta prometedora línea de investigación. Los amplificadores de fibras dopadas con neodimio no satisfacían las necesida-



3. EL AMPLIFICADOR DE FIBRA requiere una fuente de radiación de bombeo y una fibra óptica monomodo cuyo núcleo esté contaminado con erbio. La fibra amplifica las señales a medida que los átomos de erbio absorben la radiación de bombeo y transfieren su energía a las señales. La intensidad de esta radiación de bombeo va disminuyendo a lo largo de la fibra. En consecuencia, la señal crece en intensidad al avanzar por la fibra hasta llegar a un punto en el que la intensidad de la radiación de bombeo cae por debajo de cierto valor umbral.

des de aquella época, pues tales amplificadores de fibras operaban en la región de 1,06 micrometros mientras que el trabajo de los investigadores se centraba en aplicaciones que utilizaban longitudes de onda de 1,3 o 1,55 micrometros, en las que la transparencia de la sílice es máxima. ¿Sería posible contaminar las fibras con otros elementos de tal modo que pudiera obtenerse un dispositivo capaz de operar en la gama de longitudes de onda adecuada?

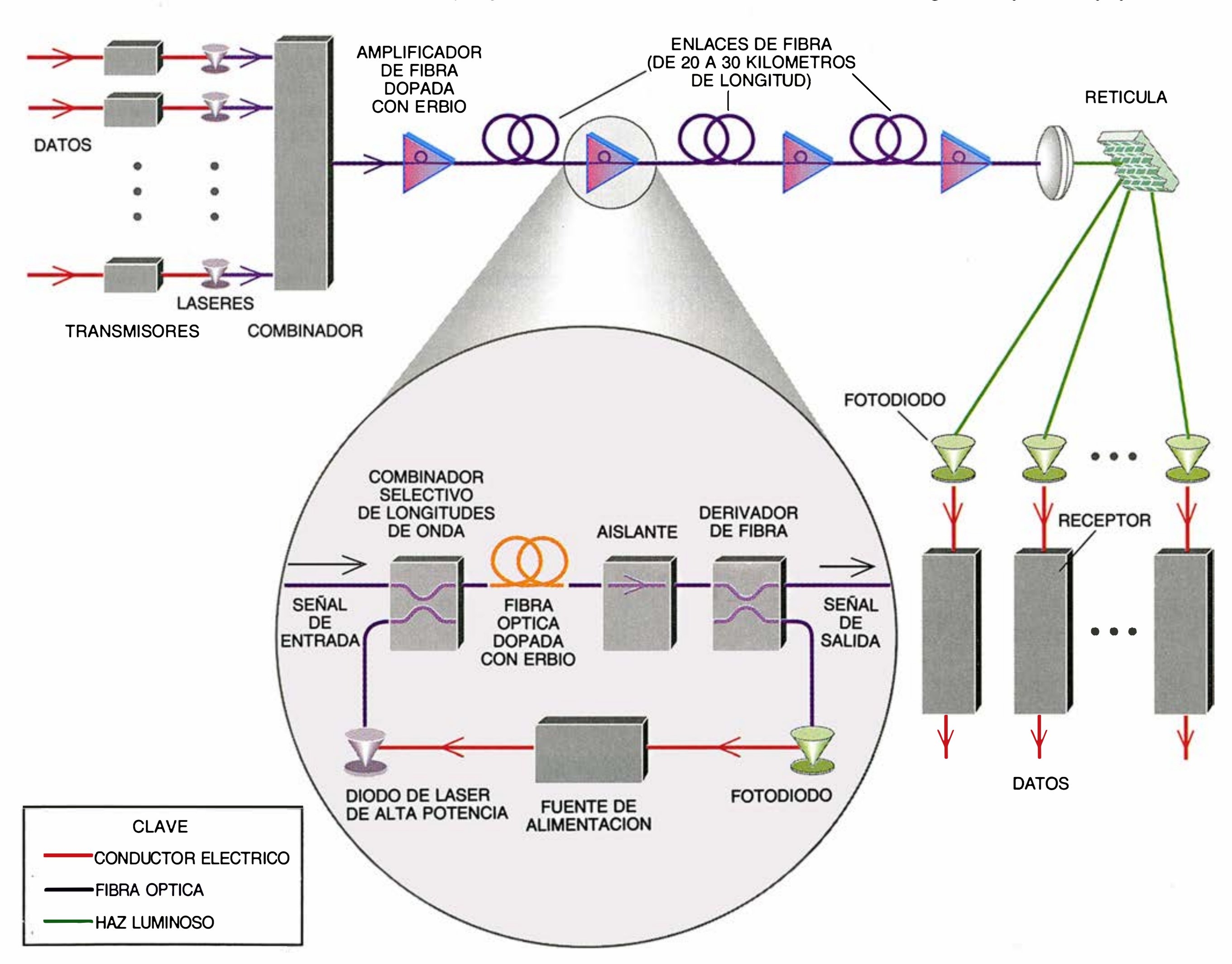
Esta posibilidad no se estudió hasta 1985-1986, cuando el grupo de David Payne, de la Universidad de Southampton, reavivaron el interés por las fibras dopadas con elementos de tierras raras. Concretamente, demostraron que una fibra dopada con erbio podría convertirse en un nuevo tipo de amplificador óptico en 1,55 micrometros. Un año más tarde, alcanzaron una ganancia de 25 decibelios para esa longitud de onda, bombeando una fibra dopada con erbio con 60 miliwatts de luz roja, de 0,65 micrometros de longitud de onda.

La mayoría de los que conocieron el trabajo realizado en Southampton lo consideraron probablemente mero ejercicio académico sin mayor interés práctico. Sus críticas se justificaban por la dificultad que entraña la generación de luz roja intensa a 0,65 micrometros, obligando a utilizar láseres grandes y pesados. Sin embargo, estas críticas no tuvieron en cuenta que el erbio puede también ser bombeado en otras longitudes de onda: en particular, se le puede excitar con radiación infrarroja, la cual puede obtenerse de un dispositivo muy práctico, la pastilla de láser de diodo.

Andaba yo muy interesado por el trabajo del equipo de Southampton, tras haber pasado varios años experimentando con amplificadores de fibras que intensificaban las señales a través de un proceso de dispersión de Rayleigh. Cuando en 1986 me incorporé en la firma AT&T, deseaba investigar si era posible refinar la tecnología de los amplificadores de fibras para mejorar las redes de transmisión óptica. Inmediatamente antes de mi llegada, John B. MacChesney y Jay Simpson, que trabajaban en dicho laboratorio, habían patentado un proceso para fabricar fibras ópticas compuestas por muchos elementos, entre ellos tierras raras. Con ellos y con Philippe Becker, también de los laboraotorios Bell, colaboré para estudiar las fibras dopadas con erbio.

Utilizamos un láser de iones de argón para bombear con luz verde de 0,51 micrometros una fibra contaminada con erbio. A mediados de 1987 conseguimos una esperanzadora ganancia de 22 decibelios empleando 100 miliwatts de luz verde. Sin embargo, estos resultados no entusiasmaron a los ingenieros de redes, quienes con razón consideraron poco práctico este dispositivo.

Mi colega Randy Giles y yo toma-



4. SISTEMAS DE COMUNICACIONES para grandes distancias: se basarán, en un futuro próximo, en amplificadores de fibra óptica dopada con erbio. En estos sistemas, varios transmisores ópticos generan señales, que se combinan y encauzan por una única fibra. Los amplificadores de fibra se colocan entre tramos ordinarios de fibra óptica e intensifican periódicamente las señales. Cuando la señal emerge del conjunto de fibras, se focaliza sobre una red óptica y es allí dividida. Las señales resultantes se guían entonces hasta distintos receptores. La figura ampliada muestra los detalles de un amplificador de fibra: un fotodiodo mide la intensidad de la señal de salida y proporciona la realimentación necesaria.

mos entonces una decisión muy poco ortodoxa. En buena lógica, el paso siguiente tendría que haber sido abandonar todo el proceso o bien intentar la construcción de un amplificador de fibra más práctico. En lugar de ello, nos propusimos ver la calidad de transmisión de datos que podía ofrecer este extraño amplificador de luz verde. Procedimos, pues, a medir la tasa de errores de un tren de datos, obteniendo, tras varias horas de lucha contra algunos efectos espúreos, una tasa de errores de una parte en mil millones para un flujo de datos de dos gigabits por segundo. Esta tasa es igual al valor estándar aceptado por la industria cuando se refiere a comunicaciones "sin error".

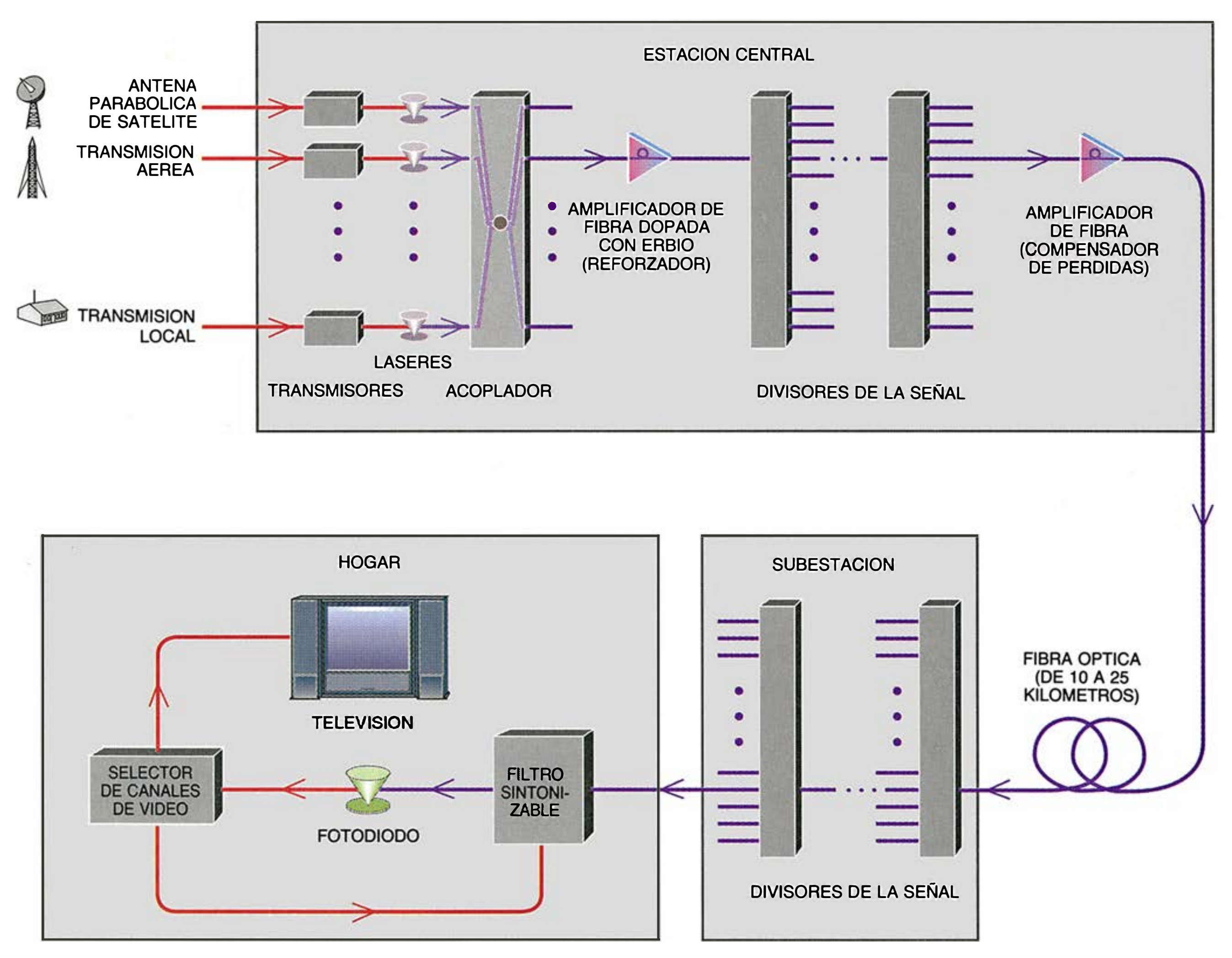
Lo más importante de todo fue que la ganancia observada no dependía de la polarización de la señal, mientras que los amplificadores de semiconductores desarrollados hasta entonces eran sensibles a dicha polarización. Este resultado fue el primer indicio de que las fibras contaminadas con erbio podrían ofrecer ventajas reales frente a otros tipos de amplificadores.

Alentados por estos descubrimientos, realizamos una prueba para determinar si las fibras dopadas con erbio podían regenerar varias señales a un mismo tiempo; vimos que sí. Las señales no se interferían unas con otras; más concretamente, la diafonía entre señales resultaba despreciable. Con esto, ya habíamos descubierto una segunda ventaja de estos amplificadores de fibra contaminada con erbio.

A finales de los ochenta, mis colegas y yo nos dispusimos a construir un amplificador de fibra dopada con erbio. En primer lugar, y por encima de todo, necesitábamos demostrar que los compactos diodos de láser podían reemplazar a los láseres de gran volumen como medios eficientes para excitar estos amplificadores de fibra.

Nuestro trabajo se complicó por el hecho de que, si bien pueden utilizarse radiaciones de varias longitudes de onda diferentes para producir la excitación del erbio, tan sólo algunas de ellas resultan eficaces. Por ejemplo, cuando un átomo de erbio se bombea con luz de 0,67 o 0,80 micrometros, absorbe un fotón y alcanza así el nivel de energía deseado, pero luego puede saltar a un segundo estado excitado absorbiendo un segundo fotón. En un amplificador de fibra, una fracción de los átomos de erbio salta directamente a este segundo estado, y ello impide que puedan transferir su energía a la señal óptica, reduciéndose por tanto el rendimiento del amplificador.

Afortunadamente, por un azar de la naturaleza, la radiación de 0,98 o 1,48 micrometros puede excitar al erbio sin sufrir este efecto indeseado. Esas longitudes de onda se pueden obtener de diodos de láser de semiconductor fabricados con compuestos de indio, galio, arsénico y fósforo. También por fortuna, las fibras de sílice se pueden diseñar de tal modo que la luz

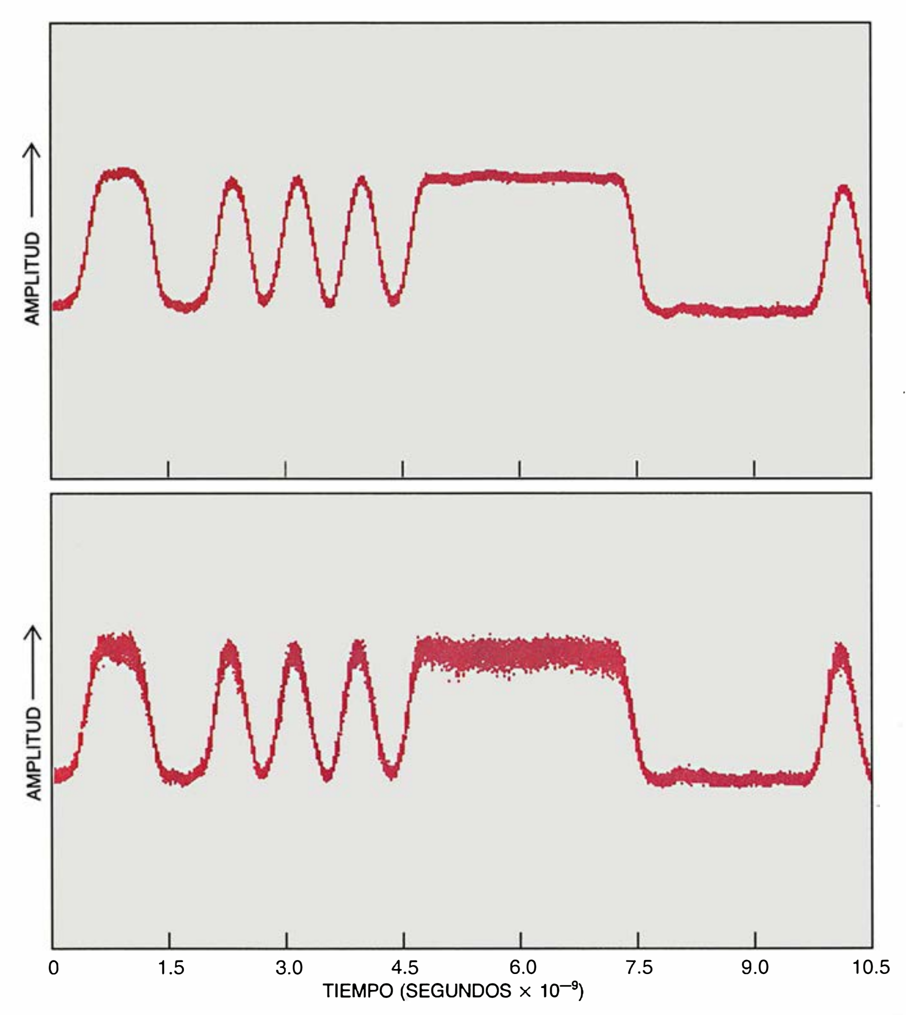


5. RED DE DIFUSION para televisión de alta definición y otros servicios de comunicaciones. Constituye ésta uno de los sistemas que podría explotar las ventajas de los amplificadores de fibra contaminada con erbio. Se podría transmitir señales a una distancia de 25 km, y alcanzar así a unos 10 millones de usuarios. Una vez recibidas o generadas, las señales eléctricas se propagan hasta llegar a una serie de transmisores y láseres que las convierten en luz. Las señales se combinan en una sola y se dirigen a diferentes fibras. Los amplificadores intensifican la señal cuando ésta se divide y cuando se atenúa al avanzar por una fibra ordinaria. Por último, la señal llega al usuario, que puede seleccionar la porción que desee.

de 0,98, 1,48 o 1,55 micrometros se propague en un modo único (fibras monomodo). Este tipo de propagación resulta deseable por permitir que la fibra transporte luz de alta intensidad, capaz de excitar los átomos de erbio con muy alto rendimiento.

Con el fin de determinar el posible uso práctico de los diodos de láser, tanto mi grupo como otros comenzamos utilizando láseres convencionales para comprobar el comportamiento de las fibras contaminadas con erbio cuando son excitadas con radiación de 0,98 o de 1,48 micrometros. El equipo de Southampton realizó muchas de las primeras experiencias en longitudes de onda de 0,98 micrometros, que resultó ser la radiación más eficaz para el bombeo. Entretanto, mi grupo se concentró en la radiación de 1,48 micrometros, longitud de onda en la cual había logrado mayor madurez la tecnología de los diodos de láser. A estas investigaciones se sumaron, entre otras instituciones, los laboratorios de investigación de la Compañía Nipona de Telégrafos y Teléfonos (NTT). Los mejores resultados obtenidos hasta ahora, tal como informa AT&T para la longitud de onda de 1,48 micrometros y NTT para la de 0,98 micrometros, indican que un amplificador de fibra contaminada con erbio, alimentado por una potencia de tan sólo 10 miliwatts, puede alcanzar una ganancia entre 30 y 40 decibelios. Se demostró que estos niveles de potencia caen dentro de las posibilidades de los diodos de láser, que pueden actualmente generar más de 200 miliwatts de luz a 0,98 y 1,48 micrometros.

Quizás el hecho más significativo haya sido el que en 1989 NTT demostrara que un amplificador podía ser bombeado con alto rendimiento mediante un diodo de láser. Esta misma compañía hizo funcionar con éxito el prototipo de un sistema constituido por amplificadores de fibra contaminada con erbio y enlaces de fibras ordinarias; este sistema podía transportar en aquellos tiempos alrededor de dos gigabits por segundo a una distancia de 212 kilómetros.



6. ESTAS SEÑALES (*arriba*) han recorrido 9000 kilómetros a través de un anillo de fibra ordinaria con amplificadores de fibra dopada con erbio, y emergen (*abajo*) prácticamente exentas de distorsión y de ruido. Los resultados, obtenidos por Neal S. Bergano y sus colaboradores en los laboratorios AT&T Bell, demuestran el gran potencial de los amplificadores de fibra.

Una vez que NTT hubo demostrado que podía aumentarse en gran escala la capacidad de transmisión, los grupos implicados en esa línea empezaron a competir por récords mundiales con un entusiasmo olímpico. A mediados de 1989, tanto NTT como Bell Communications Research notificaron que habían conseguido velocidades de transmisión del orden de 10 gigabits por segundo en distancias de 150 kilómetros, llevando la capacidad de transmisión máxima hasta valores del orden de 1500 gigabits.kilómetros/segundo. A finales de 1989, los investigadores de KDD anunciaron logros aún más impresionantes. Utilizando una serie de 12 amplificadores de fibra, lograron transmitir datos a razón de 1,2 gigabits por segundo a la increíble distancia de 904 kilómetros.

Seguidamente, a principios de 1990, los investigadores de NTT volvieron a destacarse con la construcción de un sistema coherente que incorporaba amplificadores de fibra, sistema capaz de transmitir datos a razón de 2,5 gigabits por segundo a lo largo de 2223 kilómetros. Con este logro, la industria había entrado en la era de los sistemas de 1000 kilómetros de alcance.

Sin embargo, ni siquiera estos resultados revelan todo el potencial de los amplificadores de fibra dopada con erbio. Con un sistema experimental que emula un enlace de transmisión de longitud muy grande, Neal Bergano y sus colaboradores de AT&T han conseguido capacidades de transmisión de hasta 50.000 gigabits.kilómetros/segundo. Esta capacidad es unas cien veces la que se ha logrado hasta este momento con sistemas de fibra óptica sin amplificadores, y diez veces la alcanzada en los sistemas tendidos por fondos oceánicos.

Dicho grupo colocó algunos amplificadores de fibra con erbio intercalados entre tramos de fibra de baja pérdida y unió los extremos del conjunto para formar un bucle. Cuando inyectaron impulsos luminosos en ese bucle, consiguieron transmitir 2,4 gigabits por segundo a 21.000 kilómetros y 5 gigabits por segundo a 9000 kilómetros. Las señales de salida aparecían sin ninguna distorsión, excepto una pequeña e inevitable cantidad de ruido generado en el amplificador de fibra. Aunque tales resultados se consiguieran utilizando un bucle de fibra, lo que se aparta un tanto de una demostración real de comunicaciones punto a punto, este logro pone de manifiesto las enormes posibilidades de los sistemas de amplificadores de fibra.

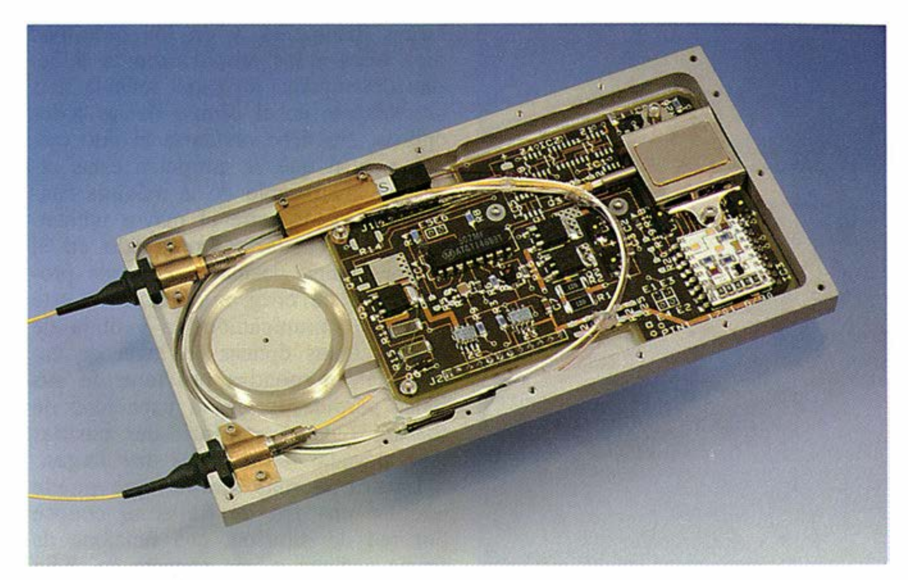
A lo largo de los cuatro últimos años, unos han concentrado sus esfuerzos en conseguir nuevos récords en

capacidades de transmisión y otros han avanzado notablemente en el estudio de los solitones y su utilización en sistemas de comunicaciones.

Un solitón puede desplazarse indefinidamente a lo largo de una fibra "perfecta", es decir, una fibra que no atenúe la luz. A semejanza de los impulsos de luz ordinarios, el solitón consta de numerosos componentes cuyas longitudes de onda difieren ligeramente entre sí, y presenta también variaciones de intensidad dentro del margen de su longitud, anchura y altura. Las ondas luminosas con distintas longitudes de onda se propagan con diferente velocidad a lo largo de las fibras; nos referimos al efecto de dispersión. Y cuando la intensidad de la luz supera cierto nivel, las ondas de igual longitud de onda pero de diferente intensidad se propagan también con velocidades diferentes, fenómeno que recibe el nombre de efecto Kerr óptico. El principio operativo de los solitones consiste en la utilización del efecto Kerr óptico para compensar la dispersión: si cada componente de distinta longitud de onda se genera de tal manera que posea una intensidad determinada, se podrá conseguir que todos los componentes avancen con la misma velocidad. Consecuencia de ello será que los solitones no se ensanchen ni se compriman al desplazarse a lo largo de una fibra sin pérdidas.

Desde luego, todas las fibras atenúan las señales en alguna medida, y los solitones decaen lentamente a medida que el impulso se va propagando. A pesar de ello, los solitones retienen su forma hasta que su energía cae por debajo de un cierto nivel crítico.

Linn F. Mollenauer, que inició el estudio de los solitones aplicados a las fibras ópticas, sugirió que los amplificadores de fibra podrían compensar las pérdidas producidas en las fibras, posibilitando así el mantener la propagación de los solitones a lo largo de distancias muy grandes. En 1988, demostró en AT&T la veracidad de su tesis: atrapando solitones en un bucle de 40 kilómetros de longitud constituido por fibras y amplificadores de fibra, Mollenauer y sus colaboradores observaron finalmente solitones que se propagaban hasta distancias del orden de 10.000 kilómetros con poco ensanchamiento. Recientemente, estos mismos investigadores han demostrado que los solitones permiten la transmisión de información, sin errores, a una velocidad de 2,5 gigabits por segundo y a la distancia de 14.000 kilómetros. Este resultado demuestra inequívocamente que los solitones podrían utilizarse para comunicaciones a largas distancias.



7. El AMPLIFICADOR DE FIBRA puede reforzar las señales telefónicas que se desplazan por los cables de fibra óptica tendidos entre los continentes. El amplificador contiene una fibra óptica dopada con erbio, arrollada en el carrete que se observa a la izquierda. La fibra está excitada con luz procedente de una pastilla de láser alojada en la cajita metálica de la parte superior derecha. Las señales luminosas entran y salen de la fibra por los cables amarillos de la izquierda. El dispositivo tiene una longitud de 15 centímetros y fue diseñado por el grupo que dirige Terry W. Cline en los laboratorios AT&T Bell. (Cline nos ha cedido la foto.)

Los solitones son los impulsos luminosos ideales para las comunicaciones. En efecto, los impulsos admiten separaciones muy pequeñas debido a que no se juntan entre sí y a que su duración es brevísima (del orden de 100 billonésimas de segundo). Los sistemas de solitones, en los que la presencia o ausencia de un solitón representa un bit individual de información, deberían alcanzar capacidades de transmisión al menos de cinco gigabits por segundo en distancias de 10.000 kilómetros.

Todavía más podrían elevarse estos valores de capacidad si se aprovecharan otras tecnologías actualmente en fase de desarrollo. Las señales transmitidas en forma de solitones permiten el envío simultáneo de varios canales de información, cada uno en diferente longitud de onda. Este sistema, denominado multiplexión por división en longitud de onda, no resulta práctico en el caso de señales que no sean solitones, ya que esas señales se dispersan y se mezclan entre sí de modo irreversible cuando son grandes las distancias. En los sistemas basados en solitones el número máximo de canales viene limitado por el hecho de que los amplificadores de fibra aumentan el nivel de las señales de diferente longitud de onda en cantidades también diferentes. Un sistema de este tipo podría en la práctica admitir al menos cinco canales y, por tanto, transportar 25 gigabits por segundo.

Mollenauer y sus colaboradores han investigado también la "multiplexión en polarización" en relación con los sistemas de solitones. Aplicando este principio, el número de canales se puede duplicar mediante la transmisión de señales que tengan la misma longitud de onda y diferente polarización, con lo cual sería posible conseguir un valor muy elevado de la velocidad de transmisión total, los 50 gigabits por segundo. Las técnicas que han de ponerse en juego para la generación, modulación y detección de los impulsos de solitones todavía se encuentran en fase de desarrollo en los laboratorios; sólo por esta razón es probable que transcurra algún tiempo antes de poder utilizarse los sistemas de solitones.

Otra alternativa para el futuro de las comunicaciones son los sistemas coherentes. Las técnicas coherentes permitirían explotar toda la gama de longitudes de onda comprendida entre 1,2 y 1,6 micrometros, disponiendo los diferentes canales ópticos en grupos apretados, con separaciones muy escasas entre sí. Para construir un sistema práctico, los investigadores todavía han de desarrollar dispositivos con agilidad de frecuencia, que presenten mayor estabilidad y un mejor control de la frecuencia absoluta. Si el progreso en este campo continúa, se podría encontrar la forma de prescindir de amplificadores ópticos en las redes de área local. Parece evidente, sin embargo, que las comunicaciones a grandes distancias seguirán dependiendo de los amplificadores ópticos. Por otra parte, todavía es pronto para predecir cuándo estarán preparados los dispositivos con agilidad de frecuencia anteriormente mencionados.

Los amplificadores de fibras dopadas con erbio tienen ya una enorme repercusión en las comunicaciones a

largas distancias, y en los próximos diez años estos amplificadores deberían desempeñar un papel todavía más preeminente en el campo de las redes ópticas. No debe olvidarse el reto tecnológico al que se enfrentan estas redes: el intercambio de la máxima cantidad de datos entre el mayor número posible de usuarios, realizado en el menor tiempo posible y con una probabilidad de error mínima. Para este tipo de comunicación, la ventaja de utilizar fibras ópticas en lugar de cables de microondas proviene de sus bajas pérdidas y de su capacidad de transmitir datos a velocidades binarias más elevadas y distancias más largas.

La forma más simple que puede adoptar una red de fibras se conoce por red de difusión, que funciona de forma análoga a una emisora de radio o televisión: los datos ópticos se transmiten desde una estación central a un conjunto de usuarios. Un amplificador de fibra podría compensar las pérdidas que se producen al dividirse una y otra vez las señales procedentes de la estación central. Otros amplificadores de fibra situados en las diferentes ramas de la red podrían compensar las pérdidas de propagación para distancias comprendidas entre 10 y 25 kilómetros, permitiendo así que aumente la extensión de la red. Es claro que a través de una de estas redes podría llegarse a un enorme número de hogares.

La empresa British Telecom ha demostrado recientemente la posibilidad de distribuir 384 canales de vídeo diferentes a casi 40 millones de usuarios potenciales en una zona de 50 kilómetros de diámetro. La superficie de cobertura de estos sistemas puede extenderse aumentando la longitud del tramo de fibra y utilizando más amplificadores de fibra para compensar las pérdidas. No obstante, debe limitarse el número máximo de usuarios porque la señal atraviesa sucesivamente muchos amplificadores y termina por acumular tanto ruido que resulta inutilizable a efectos de comunicación.

Las redes que incorporan amplificadores de fibra pueden transmitir datos a velocidades muy elevadas debido a que admiten muchos canales. El número de canales no se restringe por culpa de la dispersión, que resulta despreciable para las cortas distancias que abarcan las redes de fibras. Ahora bien, el número máximo de canales es finito debido a cuatro efectos diferentes. En primer lugar, cuando la intensidad combinada de las señales procedentes de cada uno de los canales rebasa un determinado nivel, el amplificador de erbio ya no amplifica la señal. En segundo lugar, el amplificador de fibra solamente puede transmitir un margen limitado de longitudes de onda (de 1,53 a 1,55 micrometros). En tercer lugar, las longitudes de onda de dos cualesquiera de los canales deben diferir lo bastante para que estos canales no se interfieran ni se mezclen entre sí. Por último, la ganancia del amplificador varía con la longitud de onda. El número de canales puede verse reducido también a consecuencia de las limitaciones en la capacidad de los dispositivos fotónicos para discriminar los diferentes canales ópticos.

Pese a todas las limitaciones señaladas, se ha estimado que las redes ópticas que utilizan amplificadores de fibra pueden llegar a transportar entre 2000 y 3000 gigabits por segundo. Hasta ahora ninguna otra técnica puede competir con estos valores.

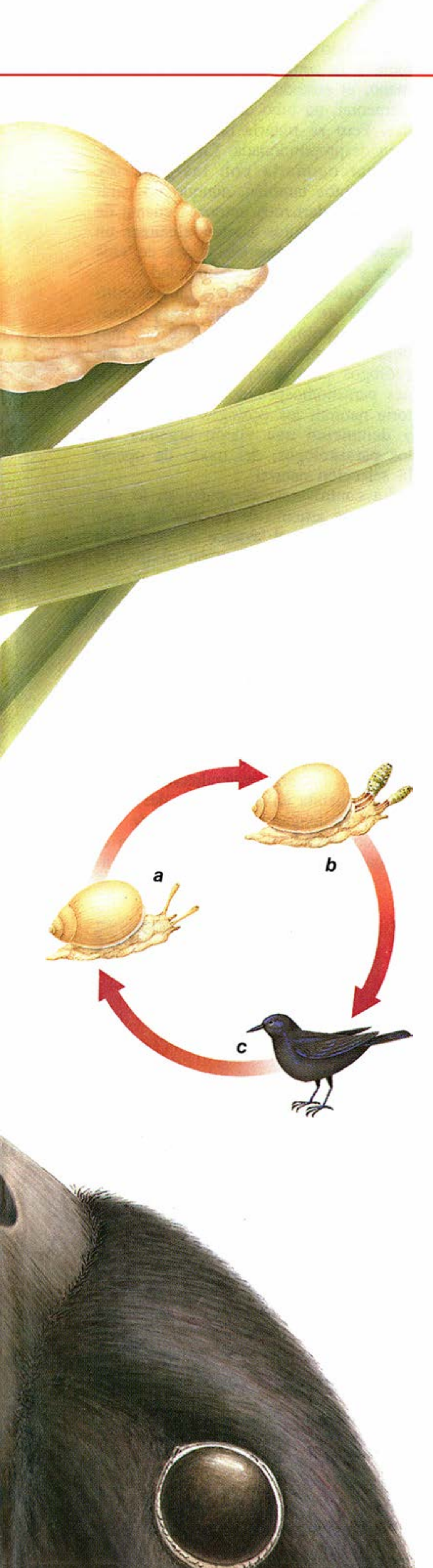
A medida que los amplificadores de fibra de erbio y otras tecnologías ópticas se vayan introduciendo en los sistemas para largas distancias y en las redes de área local durante las próximas décadas, la gente tendrá acceso a nuevos tipos de servicios de comunicaciones mucho más potentes que los actuales. Los sistemas de comunicaciones ópticas integrarán las funciones que hoy realizan los teléfonos, terminales de facsímil ("fax"), ordenadores y televisores, y ofrecerán además muchos servicios nuevos. Las empresas tendrán así acceso a inmensos bancos de datos y podrán hacer uso de redes de vídeo interactivo para mantener conferencias y reuniones a distancia; los investigadores podrán explotar plenamente los recursos de superordenadores situados a miles de kilómetros de distancia, y los ciudadanos podrán escoger libremente programas desde su casa recurriendo a videotecas. Parece razonable deducir que, así como los teléfonos y las televisiones han transformado el trabajo y el ocio en este siglo, los sistemas de comunicaciones por ondas de luz van a influir profundamente sobre la sociedad a lo largo del siglo XXI.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

BIBLIOGRAPHY ON ERBIUM-DOPED FIBER AMPLIFIERS: 1987 a 1990, Harish R. D. Sunak, P. O. Box 1668, Kingston, R. I. 02881-1668, EDFA Consultants, 1991.
FUNDAMENTALS OF PHOTONICS: Bahaa E. A. Saleh y Malvin Carl Teich. John Wiley and Sons, 1991.
MULTIGIGABIT SOLITON TRANSMISSION TRAVERSE ULTRALONG DISTANCES: L. F. Mollenauer, J. P. Gordon y S. G. Evangelides en *Laser Focus World*, vol. 27, n.º 11, págs. 159-170, noviembre de 1991.
RARE EARTH DOPED FIBERS AND DEVICES. Dirigido por M. J. Digonnet, Marcel Dekker (en prensa).

VIDA COMPARTIDA

John Rennie



Parásitos y hospedadores han ido tejiendo múltiples estrategias —sexuales incluidas, quizá— en el transcurso de un interminable proceso que se afana en "ir siempre un paso por delante" del otro. Y, sin embargo, cooperan; o así parece a veces.

No debiera extrañarnos si en la cabeza del caracol encontráramos, con destellos intermitentes, el anuncio de un figón: "Comidas". Porque la verdad es que sus tenues tentáculos oculares se han transformado en una suerte de salchichas cimbreantes y luminosas, de estrecho parecido con las orugas. Así lo ven las aves que, en pleno vuelo, localizan a esos gasterópodos y se los comen.

Por delator que nos parezca semejante tocado cefálico y, por ende, contrario a los intereses del molusco, se trata, para cierto tremátodo, de una hazaña evolutiva. Nos referimos al verme parásito *Leucochloridium paradoxum*, causante de las extrañas alteraciones de los caracoles succineidos que viven en Norteamérica y en Europa. *Leucochloridium*, que desarrolla sus estadios juveniles en el caracol, ha de pasar luego al aparato digestivo de un ave para completar su ciclo vital. Los parásitos, al invadir los tentáculos oculares del molusco en enormes cantidades y conferirles llamativos matices, convierten su vivienda juvenil en alimento para los pájaros, con lo que resuelven el problema de su transporte.

Helmintos, ácaros, hongos, bacterias y otros organismos parásitos reclaman cada vez mayor atención de los biólogos, no sólo de los parasitólogos. Inspirándose en las complejas relaciones parásito/hospedador, se estudia la posibilidad de que el parasitismo constituya una fuerza poderosa de la evolución, que ha pasado injustamente inadvertida. Para Douglas E. Gill, ecólogo de la Universidad de Maryland en College Park, la acción de los parásitos sobre sus hospedadores es determinante de mucho de lo que vemos en el mundo.

Con excesiva frecuencia, los biólogos han mirado a los parásitos como un tipo más de depredadores, que comen a su presa desde dentro. Pero el parásito halla en el hospedador algo más que alimento: refugio, criadero o incubadora, un vehículo para llegar a otros organismos e incluso un aliado en la lucha contra enemigos comunes. Mientras que la mayoría de los depredadores consumen presas dispares, muchos parásitos dependen exclusivamente de una sola especie hospedadora. Sin

1. LOS CARACOLES PARASITADOS del género Succinea *son una presa muy atractiva para las aves. Cuando los parásitos* Leucochloridium *maduran en los moluscos* (a), *forman unos sacos llenos de crías, invasores de los tentáculos oculares del caracol, que adquieren el aspecto de orugas comestibles* (b). *Este disfraz favorece a los parásitos, que han de arribar al aparato digestivo de las aves para poner sus huevos y completar su ciclo vital* (c).



2. EN LA CARRERA DE LA REINA ROJA, descrita por Lewis Carrol, los competidores corren lo más rápido que pueden, justo para permanecer en el mismo sitio. Parásitos y hospedadores podrían hallarse en similar situación.

embargo, también los hospedadores dependen, a veces, de sus parásitos; las termitas perecerían sin las bacterias presentes en su aparato digestivo, que convierten en azúcar las fibras de madera.

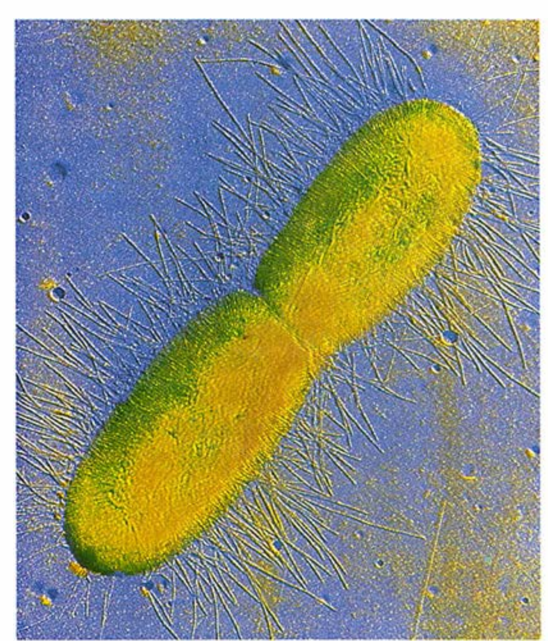
Los métodos propios de la biología y los modelos matemáticos se unen ahora para desentrañar la coevolución conjunta de parásitos y hospedadores. Los expertos se afanan en comprender por qué algunas parejas de organismos avanzan en su permanente animosidad, en tanto que otras se encaminan hacia una cooperación mutua menos renuente. Algunas de las conclusiones extraídas ya —así, la de la aparición del sexo para frustrar a los parásitos— resultan controvertidas. Lo que apenas se cuestiona es que el fenómeno del parasitismo ha modelado profundamente la vida desde su inicio.

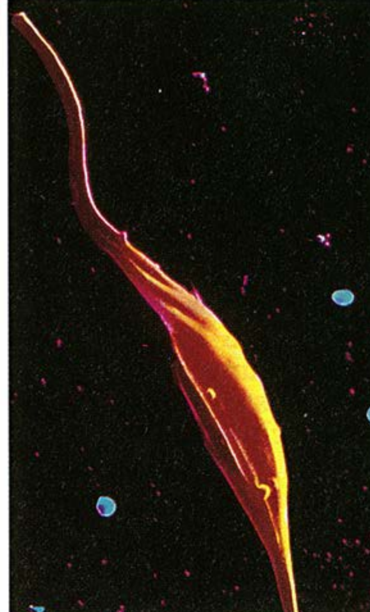
Con la nueva atribución de agentes de cambios evolutivos, ha llegado el momento de abordar a los parásitos por sí mismos. Se les venía suponiendo seres primitivos, extraños, degenerados y carentes de interés. Hora es ya de atender a su refinada especialización y alto grado de adaptación.

Es obvio que, si nos fijamos en una tenia y la comparamos con el ser humano, el cestodo resulta un organismo elemental, un tubo digestivo con gónadas. Pero se trataría de una comparación desproporcionada. Lo correcto sería parangonarla con las *planarias*, platelmintos también, aunque no parásitos; nos daríamos entonces cuenta de que los parásitos suelen alcanzar un tamaño mayor que sus afines de vida libre y revestir más compejidad.

Hay cierta desconfianza en los cultivadores de unas disciplinas y otras. Los parasitólogos opinan que los modelos matemáticos empleados por los ecólogos para describir las interacciones parásito/hospedador olvidan la historia natural; los ecólogos contraatacan y denuncian una visión ingenua, en los parasitólogos, del modo de operar la selección natural.

La controversia se centra en lo que constituye artículo de fe para los parasitólogos: con el avance de la mutua coevolución y adaptación recíproca, disminuye el antagonismo entre hospedador y parásito. Parece claro que, si el parásito mata a su hospedador, él también morirá; por consiguiente, la selección natural debería primar la supervivencia de los parásitos menos virulentos y los hospedadores más resistentes. Con el tiempo, los parásitos se convertirían en comensales inocuos para sus hospedadores, como *Escherichia coli*, bacteria generalmente benigna, que habita en el intestino del hombre. Y prolongando la historia de esa vida compartida podrían terminar en el mutualismo, es decir, en aquella situa-







3. LOS PARASITOS DEL HOMBRE difieren en su patogenicidad. *Escherichia coli* (*izquierda*), bacteria que vive en el intestino, suele ser benigna. Por el contrario, los tripanosomas (*centro*), protozoos transmitidos por picadura de insectos, causan la enfermedad del sueño y la de Chagas. Los microorganismos del cólera (*derecha*) provocan la deshidratación del hospedador y, a veces, son muy virulentos.

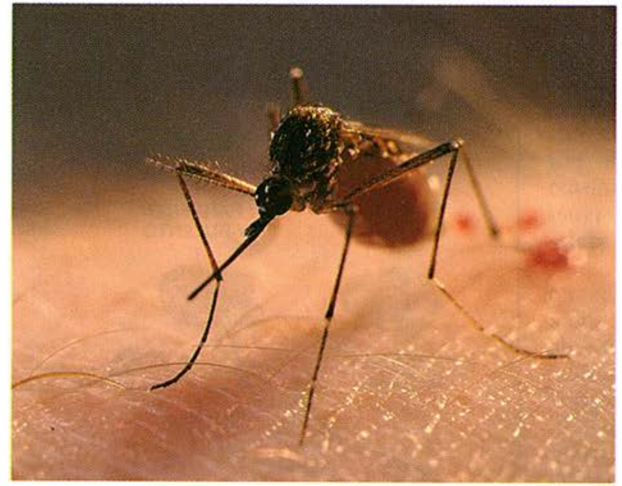
Paludismo: estudio de un caso de coevolución

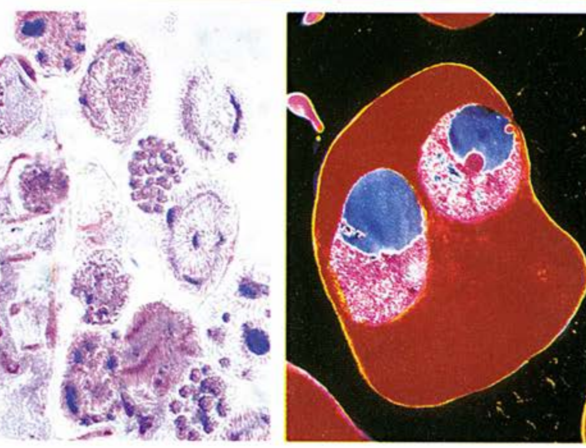
Sufren paludismo (malaria) más de 100 millones de personas, de las que mueren 1,5 millones. Con hospedadores humanos y parásitos de la malaria compitiendo en una carrera de armamentos coevolutiva, cabría esperar que tal flagelo hubiera perfilado la evolución de ambos socios. El año pasado se descubrieron nuevas pruebas genéticas de que, ciertamente, así ha ocurrido.

En febrero de 1991, en la reunión de la Sociedad Británica de Parasitología, Adrian V. S. Hill, del instituto de medicina molecular de la Universidad de Oxford, junto con un grupo internacional de investigación, anunció el descubrimiento de dos genes que protegen al hombre contra el paludismo. Ambos genes codifican las proteínas del complejo principal de histocompatibilidad (MHC), moléculas que utiliza el sistema inmune para reconocer las células infectadas. Tras el examen de más de 2000 pacientes en Africa occidental, el grupo de Hill comprobó que los portadores de esos genes MHC padecían menos casos graves de malaria.

Los dos genes MHC proliferan más en las poblaciones habitualmente expuestas al paludismo. El 40 por ciento de los habitantes de Nigeria, donde el paludismo es endémico, portan uno de los genes, mientras que sólo lo tienen el 2 por ciento de los negros sudafricanos, y menos del 1 por ciento de los blancos y asiáticos. Estos descubrimientos son una prueba firme de que la amplia diversidad de genes MHC hallados en la población —el hombre produce cientos de tipos— puede haber sido una respuesta a las presiones evolutivas ejercidas por las enfermedades parasitarias.

El otro gen humano que confiere resistencia al paludismo es el responsable de la anemia de hematíes falciformes. Las personas que reciben dos de estos genes fallecerán, porque sus hematíes producen una forma defectuosa de hemoglobina, la molécula vehiculadora del oxígeno. Los portadores de un solo gen no suelen padecer anemia, porque tienen otro gen productor de hemoglobina normal. La anemia de hematíes falciformes es bastante rara en la mayoría de los grupos étnicos, pero es frecuente entre algunos africanos y sus descendientes. En Gambia, por ejemplo, aproximadamente la cuarta parte de su población porta este gen.





LA MALARIA es transmitida por mosquitos (arriba), *que inyectan el parásito* (izquierda) *en la corriente sanguínea. Más tarde, los parásitos infectan los glóbulos rojos* (derecha).

La prevalencia del gen de hematíes falciformes en Africa era un misterio hasta los años cincuenta, cuando se observó que los portadores del mismo mostraban excepcional resistencia al paludismo. Dado que los beneficios de la resistencia antimalaria superaban a la mortalidad por anemia falciforme, la selección natural condujo a la persistencia del gen en las poblaciones africanas y no a su eliminación.

Los efectos protectores de los genes MHC recientemente descubiertos representan la mitad de los debidos al gen de hematíes falciformes. No obstante, como los genes MHC se hallan en más miembros de la población, pueden proteger a más personas. Mientras que el gen de hematíes falciformes puede prevenir un equivalente al 12 por ciento del total de casos graves, los genes MHC pueden hacerlo con un 15 por ciento.

La investigación sobre los parásitos de la malaria comienza a descifrar por qué el paludismo de *Plasmodium falciparum* —que causa el 95 por ciento de todas las muertes por malaria— es mucho más letal que el causado por otras especies. *P. falciparum* tiene mucha más afinidad con los parásitos del paludismo aviar que los otros plasmodios humanos. El hombre puede haber adquirido *P. falciparum* a partir de las aves sólo en los últimos 10.000 años, tardanza que explicaría su virulencia mayor que los demás parásitos de la malaria: el hombre no ha desarrollado todavía una buena defensa inmunitaria contra aquél.

ción en que los organismos contribuyen al bienestar recíproco, tal y como sucede con los hongos y las algas que forman los líquenes.

Este enfoque de la coevolución, coherente a primera vista, es rechazado por muchos teóricos de la evolución. Tomando por ejemplo dos cepas de tenia, parásitas del ciervo de cola blanca pero de desigual virulencia, el sentido común nos llevaría a afirmar que la tenia menos patógena debería tener la ventaja competitiva. Como su hospedador vivirá más tiempo, el cestodo producirá más huevos, durante la vida del ciervo, que su congénere letal para el mamífero.

Sin embargo, la virulencia de un parásito frecuentemente refleja su capacidad de reproducirse con éxito. Si el parásito agresivo puede transmitir

más huevos en menos tiempo que el benigno, siempre tendrá ventaja. Aun cuando el ciervo muera de inmediato, la descendencia del agresivo será más numerosa en la generación siguiente. En vez de disminuir con el tiempo, la agresividad de los parásitos aumentaría en consecuencia, mientras hubiera ciervos disponibles. Ciervos y parásitos pueden llegar hasta la extinción por estos cambios, pero ningún organismo vivo, ni siquiera el hombre, da pruebas de ser capaz de planificar sabiamente su futuro.

La razón de que los parásitos no hayan aniquilado cuanto respira sobre el planeta estriba en la naturaleza de la dinámica de sus interacciones, muy variable. Roy M. Anderson y Robert W. May, de la Universidad de Oxford, han demostrado que el punto final evolutivo de las interacciones parásito/hospedador depende mucho de cada caso. Unas veces les toca perder a los parásitos, otras se hacen mutualistas y, en ocasiones, se atenúa su virulencia hasta un nivel intermedio. En la mayoría de los casos no se percibe ninguna predisposición hacia el mutualismo.

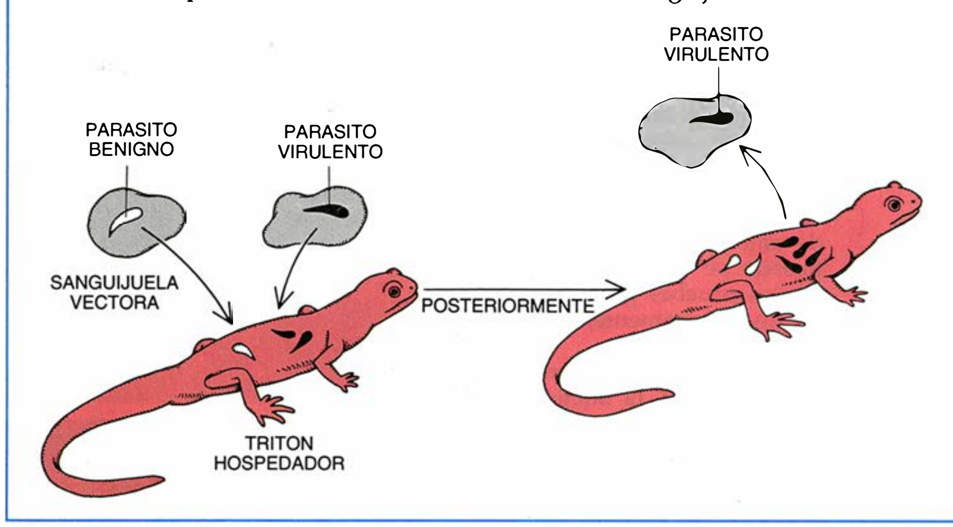
La metáfora habitual en este campo asocia el parasitismo a una carrera coevolutiva de armamentos. Los parásitos tienen que estar adaptándose sin cesar para tomar sus recursos de sus hospedadores y producir su descendencia parasitaria. Los hospedadores deben adaptarse vigilantemente para detenerlos. Si los intereses de ambos llegan a una suerte de equilibrio, se producirá una *détente* biológica, en la que ni parásitos ni sus hospedadores pueden descansar, pero tampoco corren peligro de extinción. En 1973, Leigh Van Valen, de la Universidad de Chicago, bautizó esa situación como una carrera de la Reina Roja, personaje de la obra de Lewis Carroll *Alicia a través del espejo*, donde se lee: “Ahora, aquí, como ves, es preciso correr cuanto puedas, para permanecer en el mismo sitio.”



4. EL PLUMAJE VISTOSO del macho de la gallina roja de la jungla, de la que deriva la doméstica, puede constituir motivo de atracción para las hembras que buscan pareja resistente a los parásitos.

Soportables . . .

Los parásitos relativamente benignos suelen hallarse en desventaja para competir. Los soportables que se aposentan en los tritones deben reproducirse más despacio que los parásitos virulentos y parece, pues, que llevarán las de perder a la hora de ser transmitidos a sanguijuelas vectoras.



Jugar para ganar

Los parásitos parecen los favoritos para la victoria: al contar con tiempos de generación más cortos que sus hospedadores, la selección natural permitirá que sus poblaciones puedan adaptarse bien con mayor celeridad. Pero los hospedadores de larga vida suelen disponer de defensas inmunitarias. Las poblaciones de linfocitos y otras células del sistema inmune de los mamíferos, por ejemplo, pueden cambiar rápidamente para identificar y atacar a nuevos parásitos. El sistema inmune redefine constantemente el panorama celular y bioquímico al que tienen que enfrentarse los parásitos en el hospedador.

Los parásitos pueden también lanzarse al contraataque. A finales de los años setenta, George A. M. Cross y otros descubrieron un perverso mecanismo en los tripanosomas, organismos transmitidos por moscas, causantes de la enfermedad del sueño (tripanosomiasis africana). Las víctimas no pueden desembarazarse de los parásitos, porque éstos alteran sus caracteres inmunológicos a cada generación.

Cross ha demostrado que los tripanosomas disponen de una biblioteca de unos 1000 genes para las diversas proteínas de superficie, de los cuales sólo uno se expresa al azar. Halló también que estas proteínas antigénicas de superficie se desprenden del tripanosoma, cuando éste queda dañado, lo que hace más difícil para el sistema inmune centrarse en el foco del ataque.

Hay parásitos que explotan a sus hospedadores sin atacar directamente su salud. Helen M. Alexander, de la Universidad de Kansas, ha descubierto que *Ustilago violacea*, un hongo parásito, manipula la estrategia reproductiva de la colleja, mala hierba cazamoscas. Si la planta hospedadora es masculina, el hongo la esteriliza, transformando los estambres florales productores de polen en órganos diseminadores de esporas fúngicas. Si la planta es femenina, el hongo la fuerza a producir flores masculinas estériles, para repetir el proceso formador de esporas, en vez de polen. Los insectos atraídos a las flores infectadas de la planta toman su carga de esporas, que llevan a otras collejas.

Parásitos hay que manipulan el comportamiento de sus hospedadores en su propio provecho, generalmente como medio de alcanzar al siguiente hospedador. Wilhelm Hohorst ha demostrado que las hormigas infectadas con la duela lanceolada *Dicrocoelium dendriticum* se traban a las hojas de las hierbas con sus propias mandíbulas. Después, las hormigas son comidas por las ovejas pastantes, que son el siguiente hospedador en el ciclo del tremátodo. Los estudios realizados por Janice Moore, de la Universidad estatal de Colorado, han demostrado que los isópodos intermediarios de los acantocéfalos parásitos se comportan de modo que resultan fácil presa para los pájaros canoros.

Ante tan maquiavélicas tácticas de los parásitos, los hospedadores que

. . . y virulentos

Los tritones juveniles tardan seis años en desarrollarse, intervalo que pasan fuera de las charcas y que introduce una presión de selección contra los parásitos virulentos. Sólo los hospedadores que portan parásitos soportables viven tiempo suficiente para volver a las charcas, lugar de infección.



compiten en la carrera armamentista coevolutiva podrían verse forzados a desarrollar sus propias armas secretas. Algunos sospechan de un fenómeno cuya existencia los ha desconcertado largo tiempo: el sexo. En términos evolutivos, el sexo es un derroche; resulta más rentable la reproducción asexual, que sólo implica un individuo de la especie. Unese a ello el coste redoblado del sexo, pues los machos no suelen aportar tanto como las hembras a la generación y crianza de los hijos. Se malgasta la mitad del esfuerzo reproductivo en un género que realmente no contribuye a la expansión de la descendencia; tales desventajas deberían crear una presión de selección fortísima, para eliminar el sexo. Lo desconcertante del caso es por qué no se consiguió.

Opina así William D. Hamilton, de la Universidad de Oxford, quien atribuye la pervivencia del sexo a las ventajas especiales que ofrece en la lucha contra los parásitos. La recombinación de grandes bloques de información genética derivados del sexo ayuda a diversificar las características de la descendencia del hospedador, de modo más rápido y eficiente que lo haría la mutación. Estos descendientes, por tanto, pueden oponer resistencia a los parásitos que invaden a sus progenitores, mientras que la descendencia genéticamente idéntica de progenitores asexuales no dispondría de tal salvaguardia. (Dado su breve tiempo de generación y sus tasas evolutivas extremadamente rápidas, los parásitos parece que tienen menos necesidad del sexo; la mayoría de los parásitos son asexuales durante parte o toda su vida.)

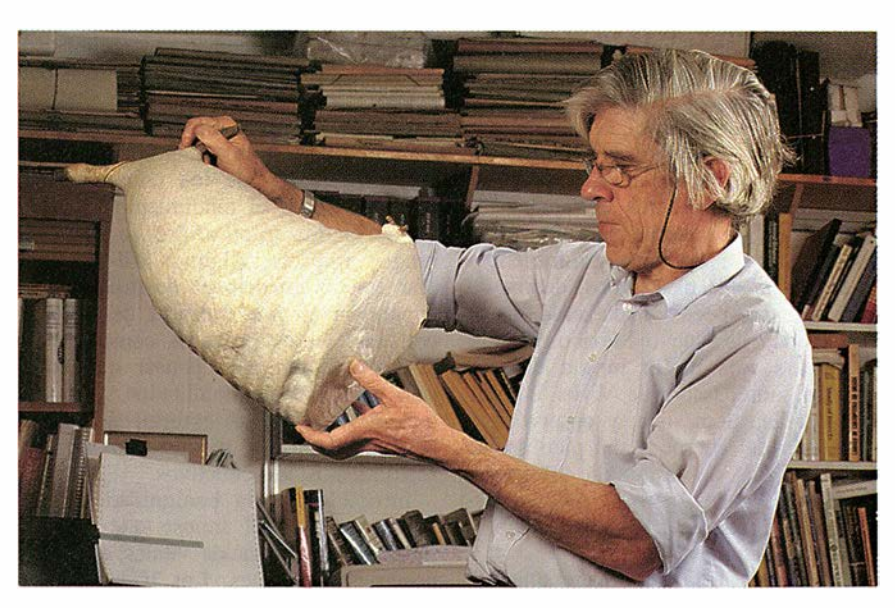
La estrategia del sexo

También cree Hamilton que el sexo ayuda a que una población de hospedadores retenga factores de resistencia que, si bien han perdido transitoriamente su eficacia, pueden recuperarla de nuevo. La población de parásitos se adaptará al tipo más común en la población de hospedadores; conforme vayan sucumbiendo tales hospedadores irán apareciendo otros tipos menos comunes, que caerán del mismo modo, llevando a lo que Hamilton llama "renovación no-progresiva". Se trata de una carrera parásito/hospedador ligeramente distinta de la armamentista famosa, porque la resistencia del hospedador no necesita aumentar continuamente: el genotipo común del hospedador cien años atrás puede volver a aparecer con idéntica frecuencia. En resumen, la carrera de la Reina Roja discurriría, a veces, en círculos.

No todos achacan al parasitismo la aparición del sexo. Entre otras explicaciones destaca la que sostiene que el sexo elimina de la población las mutaciones deletéreas. Pero Hamilton objeta que no se aborde con un modelo realista el reto que supone el doble coste del sexo.

Algunos trabajos parasitológicos de campo respaldan la idea de Hamilton. En 1990, Robert C. Vrijenhoek y Clark Craddock, de la Universidad Rutgers, y Curtis M. Lively, de la de Indiana, publicaron un estudio sobre peces sexuados y asexuados de México, que corroboraban las ventajas antiparasitarias del sexo. Comprobaron que los clones de peces asexuados estaban parasitados por tremátodos con más frecuencia que los sexuados, excepto cuando la diversidad genética de los peces sexuados era extremadamente baja, a consecuencia de la endogamia. En la población endogámica, la ventaja antiparasitaria desaparecía, porque incluso los mismos peces sexuados eran muy parecidos. No obstante, cuando se introdujeron más individuos sexuados en la población consanguínea, el nivel de parasitismo decayó rápidamente.

Lively ha observado también una relación similar entre sexo y parasitismo en ciertos caracoles de Nueva Zelanda. Las hembras asexuadas parecían abundar más en los hábitats con relativamente pocos tremátodos parásitos; tanto machos como hembras eran comunes donde los parásitos abundaban.



5. WILLIAM D. HAMILTON, de la Universidad de Oxford, considera que el sexo evolucionó como un arma estratégica en la carrera armamentista coevolutiva entre parásitos y hospedadores. Sostiene entre sus manos el habitáculo de una especie de avispa social.



6. DOUGLAS E. GILL, de la Universidad de Maryland en College Park, descubrió por qué ciertos parásitos de los tritones eran poco patógenos, tras el estudio de los ciclos vitales de aquéllos.

En 1982, Hamilton y su discípula Marlene Zuk, docente hoy en la Universidad de California en Irvine, ampliaron la hipótesis de la relación del sexo con el parasitismo, proponiendo que la carrera de la Reina Roja puede influir en la elección de pareja por parte de la hembra. En muchos casos, de los que el ejemplo mejor conocido son los pavos reales, las hembras eligen a los machos durante algo así como un concurso de belleza, en el que éstos se pavonean exhibiendo su plumaje de brillantes colores o sus caracteres sexuales secundarios. Se ha visto en tal despliegue la manifestación de alguna cualidad valiosa; para Hamilton y Zuk, podría tratarse de la resistencia a los parásitos.

La primera prueba a que se sometió la idea consistió en el registro de ciertas aves norteamericanas para determinar si las especies cuyos machos poseían brillantes colores mostraban mayor proclividad al parasitismo que las menos ostentosas. Esa encuesta apoyó la hipótesis, no confirmada, sin embargo, en otros estudios.

Zuk halló más datos de apoyo investigando la conexión entre los niveles de parasitismo y la prominencia de los caracteres masculinos, dentro de una misma especie. Trabajando en la Universidad de Nuevo México, estudió la gallina roja de la jungla del SE asiático, antepasado de vivos colores de la gallina doméstica, y observó que el tamaño del cuerpo y del pico de las gallinas rojas de la jungla infestadas parecían normales, pero su plumaje ornamental estaba menos desarrollado y era menos atractivo.

La imagen de la carrera armamentista coevolutiva, incluso la relacionada con el sexo, permite explicar casos en los que parásitos y hospedadores intensifican su lucha, tal y como sucede cuando las enfermedades son más virulentas. Menos obvia es la capacidad de esa metáfora para explicar la tendencia de algunos parásitos a perder agresividad con el tiempo.

Con gérmenes llegarás

Douglas Gill dice haber hallado la respuesta. Por sus manos han pasado 9000 tritones. Desde 1974, dos veces por semana, durante 10 años, acudía con sus alumnos de la Universidad de Maryland hasta las montañas de Shenandoah (Virginia Occidental), donde vivía una población de tritones punteados de rojo. Capturaban nuevos ejemplares, devolvían los viejos, tomaban varias medidas y luego regresaban a casa. Cada ejemplar presentaba una disposición exclusiva de las manchas dorsales, lo que facilitó el seguimiento de la historia individual a lo largo del experimento.

En 1981, Gill y Beverly Mock, integrado entonces en su grupo, abordaron los efectos de los tripanosomas parásitos sobre el rendimiento biológico de ciertos tritones. No se percibió ningún impacto. Algunos tritones podían tolerar infecciones de millones de tripanosomas por mililitro de sangre, con casi tantos parásitos como hematíes. Era como para pensar que estarían terriblemente debilitados, pero no mostraron signos de enfermedad, ni de mortalidad precoz, ni trastornos de sus rendimientos reproductivos.

Intrigado por la benignidad de los tripanosomas, Gill supuso que debería buscarse en los ciclos vitales de tripanosomas y tritones. Los tripanosomas se transmitían de un tritón a otro mediante la picadura de sanguijuelas anfibias. Por tanto, sólo podían transmitirse entre tritones en las charcas. Pero los tritones no se confinan al medio acuático; al final del verano, los juveniles abandonan las charcas camino de los bosques, donde pasarán los seis años de su desarrollo.

Tal intervalo, razona Gill, introduce una presión de selección contra los tripanosomas dañinos. Los tritones portadores de tripanosomas, incluso marginalmente virulentos, mueren, a buen seguro, antes de llegar a adultos, tras haber regresado a una charca y sucumbir por la infección. De lo que resulta que sólo se reciclan los tripanosomas menos virulentos, para formar la población parasitaria y reproducirse.

Paul W. Ewald, del Colegio Amherst, llegó a los mismos principios generales sobre el papel crítico de la transmisión en la evolución parasitaria. Lo hizo por una vía distinta e independiente: mediante modelos matemáticos de coste-beneficio. Trabajaba, 15 años atrás, en unos casos de trastornos intestinales, cuando empezó a pensar si la diarrea y alteraciones similares no propagarían el agente causal a otros hospedadores. Se preguntó, en particular, por los tipos de transmisión que propagaran las cepas virulentas y los que difundieran las más benignas.

Llegó a la conclusión siguiente: si un parásito puede ser transportado de un hospedador incapacitado a otros receptivos mediante un vector intermediario (moscas, mosquitos) se reproducirá agresivamente, incluso al precio de matar a su depredador; ahora bien, si el parásito depende de su hospedador para ponerse en contacto con otros individuos receptivos, entonces la selección natural favorecerá a las capas parasitarias que permiten a sus hospedadores la vida social.

Según Ewald, este principio explica las tendencias que, en lo relativo a la virulencia, se observan en los agentes de la mayoría de las enfermedades del hombre. Para él, la mitad de los agentes patógenos transmitidos por vectores se sitúan por encima del criterio de gravedad, la muerte para el 1 por ciento de los pacientes sin tratar; por contra, sólo el 10 por ciento de las enfermedades no transmisibles por vectores cumplen tal condición.

La mayoría de los biólogos comparten la idea de Ewald sobre la relación entre el modo de transmisión del parásito y grado de virulencia de la misma. Pero los hay también reticentes, como Robert May, para quien la dirección evolutiva que vaya a tomar una asociación (simbiótica) depende de las fases y pormenores del ciclo vital y está forzada por ellos.

Atendiendo a las predicciones que escapan a los modelos matemáticos —para patrones de virulencia, emergencia del sexo e importancia de la

La creatividad de la simbiosis

Para Lynn Margulis, el parasitismo y otras asociaciones simbióticas figuran entre las principales fuerzas creadoras de la evolución, no una más. Gracias a la simbiosis, los organismos mancomunan sus recursos genéticos, para lograr lo que no obtendría cada socio por separado. Pocos teóricos discutirían esa aseveración en línea de principio. Pero Margulis recrimina a sus colegas la obsesión por los modelos matemáticos basados en la competencia entre organismos, con olvido de otras influencias biológicas. Acepta ella que la selección natural puede elegir los simbiontes de cada uno de los socios, o un animal con un determinado genoma, en vez de otro; pero su misión sería la del redactor editorial, no la del autor.

Quizá la mejor ilustración de la secuencia sea el origen endosimbiótico de las células eucariotas. Aunque la idea no es originariamente suya, a Margulis se le debe el haber indicado las vías de verificación de la hipótesis. Así, mitocondrias y cloroplastos poseen genes que no guardan relación con los del núcleo de las células eucariotas, sino que son similares a los presentes en algunas bacterias. Ello significa que las células eucariotas, en el curso de la evolución, no tuvieron que reinventar la respiración, ni la fotosíntesis a través de pruebas y errores genéticos. Los primeros eucariotas se limitaron a adquirir estas facultades que les ofrecían las bacterias, y las incorporaron como endosimbiontes (socios simbióticos internos).

LAS CELULAS COMPLEJAS evolucionaron a través de una serie de simbiosis entre organismos más simples.

Se van acumulando pruebas de la notable pluralidad de sucesos endosimbióticos, que no se limitan a las células procariotas. Susan E. Douglas descubría el año pasado la asociación simbiótica de dos eucariotas para crear una criptomónada, alga de agua dulce.

Las criptomónadas contienen una estructura membranosa insólita, un nucleosoma, dotado de ADN y ARN, las claves moleculares de la vida. Hará unos diez años, Sally Gibbs propuso que el nucleosoma representaba el resto de un alga roja que parasitó, tiempo atrás, a un hospedador eucariota. El grupo de Douglas ha confirmado la idea y demostrado que el ADN del nucleosoma guarda con el de las algas rojas mayor similaridad que con el del núcleo de la criptomónada. Según manifiesta, la criptomónada ancestral se hizo fotosintética mediante la incorporación de algas rojas provistas de cloroplastos.

La simbiosis es consustancial a la mayoría de los organismos. Aproximadamente el 90 por ciento de las plantas terrestres son micorrizas: los hongos asociados a sus raíces les resultan imprescindibles para extraer los nutrientes del suelo. Herbívoros e insectos dependen de microorganismos presentes en sus intestinos para digerir la celulosa que comen.

Peter W. Price, de la Universidad del Norte de Arizona, ha diseñado un esquema evolutivo según el cual los herbívoros podrían derivar de la simbiosis entre animales y fitoparásitos microscópicos. El parásito, dice, ya habría desarrollado enzimas para digerir los materiales de su planta hospedadora.

Si un hospedador animal fuera a establecer una simbiosis con un parásito, podría luego compartir los nutrientes derivados de la materia vegetal. A partir de entonces, la asociación herbívora podría difundirse por dondequiera que creciera la planta. Su éxito en hallar nuevos recursos alimentarios favorecería la selección natural de más animales capaces de una simbiosis similar. El problema radica aquí en la simbiosis entre animal y fitoparásito. Price sospecha que los parásitos están preadaptados a la vida en asociación íntima con hospedadores y que estas adaptaciones ofrecen a los parásitos una predisposición para establecer nuevas asociaciones mutualistas. No obstante, la naturaleza de estas preadaptaciones está sin esclarecer.

Price destaca que la selección favorecerá siempre al parásito que tienda a producir un impacto beneficioso en el hospedador. Según él, los creadores de modelos evolucionistas llegan a conclusiones diametralmente contrarias, porque abordan el mutualismo como formado por dos organismos independientes. Ahora bien, en cuanto se alcanza una firme ligazón de un parásito con su hospedador, el modelo pierde interés, porque ambas especies evolucionan como si fueran una sola. De cualquier modo, no es probable que esta situación cambie, hasta que puedan cuantificarse los mecanismos que predisponen hacia la simbiosis a los organismos.

inmunidad del hospedador—, fácilmente puede creerse que los creadores de modelos han captado plenamente la esencia evolucionista de las interacciones parásito/hospedador. Muchos parasitólogos replican que queda un largo camino por recorrer.

Contra los ecólogos y sus modelos de selección natural, para las interacciones parásito/hospedador, se revuelve Lynn Margulis, de la Universidad de Massachusetts en Amherst. Les achaca una obsesión matematizadora, alejada de la genética, bioquímica y fisiología de los organismos. Caen, por ejemplo, en el error de considerar juntos virus con organismos parásitos que metabolizan y se reproducen autónomamente. La virulencia, prosigue, tampoco es una propiedad intrínseca de los parásitos: modificando la cantidad de agua o la insolación, según el medio, se provoca a veces que los parásitos parezcan más o menos dañinos.

Margulis participó en la formulación de la hipótesis Gea, o Gaia, según la cual el tejido de vida interdependiente

Parásitos cibernéticos

En sus campañas en la pluviselva de Costa Rica, Thomas S. Ray se ha visto con frecuencia rodeado de plantas parásitas, hongos, insectos y microorganismos. Pero los que más preocupan ahora a este ecólogo viven en una terminal de computadora en su laboratorio de la Universidad de Delaware.

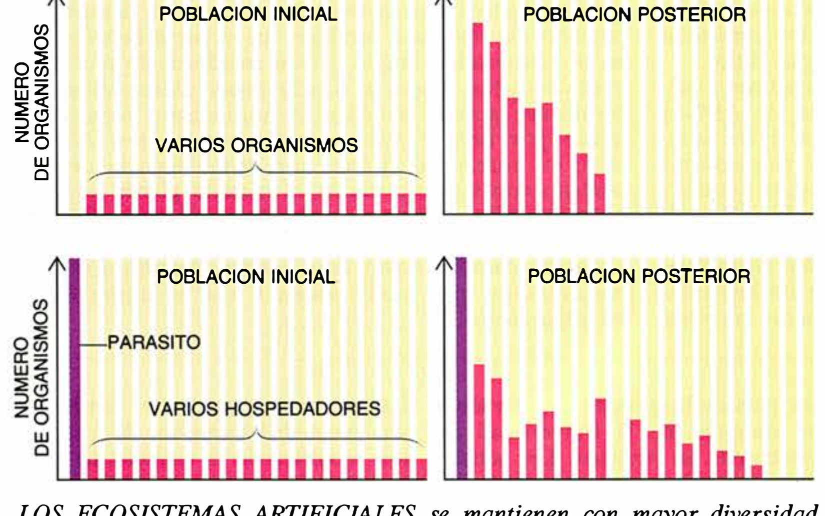
Con "Tierra", Ray creó un ecosistema imaginario, donde los organismos, en forma de programas cortos, competían por el tiempo de procesado y daban copias de sí mismos que, en ocasiones, eran imperfectas. La competencia y la mutación determinaban la evolución ulterior del sistema.

Los parásitos evolucionaban espontáneamente dentro de los primeros cinco minutos de la simulación. Con sus propias palabras: "Generalmente y, de modo inmediato, como resultado de una mutación, se logra la deleción de un amplio trozo del código, que afecta a la replicación de la criatura." Aunque él no programó las criaturas para que se comportaran así, ellas adquirían de sus vecinos íntegros la parte precisa del código genético, con lo que se convertían en parásitas. Los programas hospedadores evolucionaron para bloquear las incursiones de los parásitos; éstos, a su vez, siguieron cambiando.

El resultado fue un ejemplo perfecto de carrera armamentista coevolutiva. Incluso después del exterminio de los parásitos a manos de hospedadores afortunados, aparecían nuevos tipos de parásitos en la población hospedadora. Diríase que todo cuanto tenga éxito atrae a los parásitos, que se las ingenian para sacarle partido.

Algunas de las observaciones de Ray demuestran que los parásitos fomentan la diversidad en los ecosistemas. En los experimentos ecológicos que acometió con "Tierra", partía con 20 clases de organismos, ninguno de los cuales era parásito (deliberadamente eliminó la capacidad de mutar, para prevenir la aparición de parásitos). Al final, sólo dejó ocho. Cuando reinició la simulación con 20 clases de hospedadores y una forma de parásito, sobrevivieron 16 tipos de hospedadores. Evidentemente, los parásitos impidieron que ninguna de las especies de hospedadores llevaran a muchas de las otras hacia la extinción.

Le sorprendió, por encima de todo, el descubrimiento del sexo por parte de su criatura. Aunque impidió la mutación, las criaturas comenzaron a intercambiarse trozos de su código genético. "Yo ni siquiera había supuesto que ello fuera posible", asegura. W. Daniel Hillis, de Thinking Machines, había realizado con anterioridad algunos experimentos artificiales, en los que descubrió que, sin la presión de selección de los parásitos, el sexo tendía a desaparecer, en favor de la reproducción asexual. Ray sospecha que los parásitos activos constituyen la fuerza selectiva que mantiene el sexo en los sistemas.



LOS ECOSISTEMAS ARTIFICIALES se mantienen con mayor diversidad cuando intervienen en ellos los parásitos. En las simulaciones "Tierra", sólo ocho, de un total de 20 especies no parasitadas, sobrevivieron (arriba). *Con un tipo de parásito, persistieron el doble de especies hospedadoras* (abajo).

que se trenza sobre la Tierra determina que el planeta actúe como un sistema autorregulador y viviente (ella prefiere el término "autopoyético"). Mucho antes defendió que las células eucariotas —las provistas de núcleos diferenciados y otros orgánulos— evolucionaron a través de la unión simbiótica con células procariotas más simples, como las bacterias.

En ese contexto, las mitocondrias, que son los orgánulos que obtienen la energía a partir de oxígeno y carbohidratos, procederían de bacterias aerobias; los cloroplastos, de bacterias fotosintéticas. La mayoría de los biólogos no recibió con alborozo la idea del origen endosimbiótico de los eucariotas, aunque hay datos que la respaldan. Se acepta, para trivializarla a renglón seguido, se queja su autora, para quien no se han comprendido todavía las importantes implicaciones genéticas de la simbiosis. Las ramas de los árboles filogenéticos, sostiene, deben entrelazarse y representar nuevas alianzas simbióticas, obscurecidas hoy por el énfasis simplista que se pone en la competición y la cooperación, en muchos modelos de selección natural.

Socios silenciosos

Si comparar la importancia de la simbiosis con la de la selección natural es como comparar manzanas y naranjas, replica Hamilton entre los ecólogos, parece obligado entender el funcionamiento de la selección natural en presencia de la simbiosis. Así planteada la cuestión, puede aceptarse que la simbiosis constituye uno de los tipos de asociación más creativos en la evolución.

Hamilton trabaja en torno a la hipótesis de que la presencia de parásitos pudiera instar cambios macroevolutivos en una población de hospedadores; las diferencias en la resistencia a los parásitos podrían dividir la población en grupos reproductores menores, del mismo modo que las barreras geográficas. Sewall Wright propuso ya en 1931 que tales poblaciones fragmentadas podían expandirse hacia nuevos nichos ecológicos con mayor éxito que las poblaciones sin dividir.

Los creadores de modelos evolutivos no gozan de la simpatía de los parasitólogos de campo. Les objetan éstos, por ejemplo, que la idea que tienen aquéllos de que los parásitos dañan a sus hospedadores es incorrecta. En realidad, el número de organismos a los que llamamos parásitos, para los que se ha demostrado un impacto negativo sobre el estado de su hospedador, va siendo cada vez más restringido. Algunos parásitos constituyen graves problemas sanitarios, sin duda, pero son los menos y, en su mayoría, se trata de recién llegados a la especie para la

que son letales. Si nos fijamos en los parásitos del hombre más afines a los que sufren los primates, en los oxiuros por ejemplo, advertiremos dos cosas: su distribución por todo el mundo y su nula capacidad patogénica, aunque sí encierren un grave riesgo cosmético por el intenso prurito que producen.

El parásito saboteador de caracoles, *Leucochloridium*, es otro agente que mina la eficacia biológica de su hospedador mucho menos de lo que los observadores podrían suponer. Las masas de parásitos que viven en el caracol ocupan a veces la mitad y más de la capacidad interna de la concha, aparte de distorsionar por completo los tentáculos oculares. Lo que no impide que el gasterópodo infestado continúe alimentándose, reptando y copulando sin dificultades aparentes. (Aunque ignoramos todavía la fecundidad relativa o eficacia biológica de esos moluscos.)

Esos casos admiten una doble interpretación. La primera es de beligerancia: los organismos se han batido en el pasado, y ahora han llegado a una tregua incómoda, o todavía siguen peleándose; la segunda es de compromiso: la pugna constituye un error.

Cualquiera que sea la interpretación por la que se inclinen, muchos parasitólogos y biólogos evolucionistas tachan de reduccionistas y simplistas los términos parásito, mutualista y comensal, incapaces de captar la verdad de las interacciones a las que hacen referencia. En cierto sentido, sólo la simbiosis es real: la cuantía del daño o del beneficio que los organismos parecen causarse entre sí suele depender de lo que el experimentalista espera evaluar. Además, el estudio de la coevolución de hospedadores y parásitos puede decirnos algo sobre la coevolución de todos los organismos. Es posible que sea una guía de cómo marchan las cosas, más que indicarnos cómo compiten.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

TRANSMISSION MODES AND EVOLUTION OF THE PARASITISM-MUTUALISM CONTINUUM. Paul W. Ewald en *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 503: *Endocytobiology III*, págs. 295-306; 1987.

SEXUAL REPRODUCTION AS AN ADAPTATION TO RESIST PARASITES: A REVIEW. William D. Hamilton, Robert Axelrod y Reiko Tanese en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 87, págs. 3566-3573; mayo de 1990.

PARASITE-HOST ASSOCIATIONS: COEXISTENCE OR CONFLICT? Dirigido por Catherine A. Toft, André Aeschlimann y Liana Bolis. Oxford University Press, 1991.

SYMBIOSIS AS A SOURCE OF EVOLUTIONARY INNOVATION: SPECIATION AND MORPHOGENESIS. Dirigido por Lynn Margulis y René Fester. The MIT Press, 1991.

Ciencia y empresa

Ferrocarriles

Alta velocidad

Mary E. Hurley es alcaldesa de Springfield, ciudad a la que quisiera transformar en dormitorio de Boston, distante 130 kilómetros. Un tren de alta velocidad, a 300 kilómetros por hora, uniría ambos puntos en 25 minutos. "Es la nueva arma del desarrollo, sin igual desde la invención de la máquina de vapor", dice convencida.

Se levite y propulse sobre una guía mediante potentes electroimanes, como en los trenes de deslizamiento magnético (tredesmag) de Alemania y el Japón, o corra sobre ruedas convencionales de acero, como el tren de gran velocidad (TGV) francés, el nuevo ingenio está destinado a convertirse en técnica limpia y energéticamente ahorrativa, capaz de aliviar la congestión de carreteras y autopistas.

Las empresas privadas y las entidades públicas tienen ya más de una docena de proyectos en el tablero de dibujo. Hay quien apuesta por el tredesmag alemán (para enlazar el aeropuerto de Orlando con Disneylandia) y otros se inclinan por el modelo TGV francés para enlazar ciudades (en el estado de Texas). El inconveniente, una vez más, está en el recorte de los presupuestos para obras públicas.

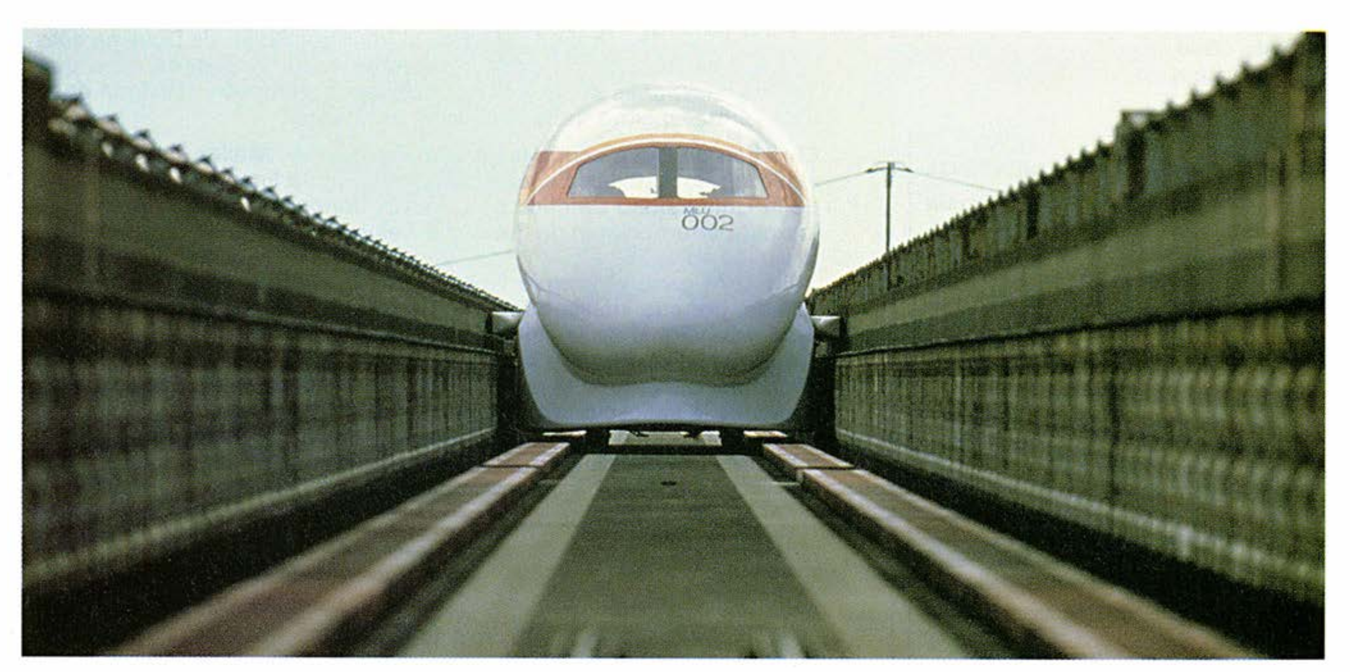
Ha terciado en esa pugna la opinión de quien defiende el desarrollo de un tredesmag norteamericano. Su principal defensor es el senador Daniel Patricio Moynihan, a quien no le convence que una técnica más, forjada en el país, se ceda a competidores foráneos. Resucita así una vieja idea. Hace 25 años, los ingenieros norteamericanos proponían la creación del primer tredesmag superconductor del mundo. Pero apenas caló la idea. Bien acogida en Japón y Alemania, llevan ahora esos estados la delantera en la carrera del tredesmag: en ambos se han producido prototipos de prueba después de invertir 1000 millones de dólares cada uno en su desarrollo, con una considerable aportación del tesoro público. Moynihan y otros sospechan que queda mucho por rematar en la técnica de los tredesmag, inmadura, y que los Estados Unidos podrían todavía dar alcance al Japón y Alemania.

Para ello, deberán empezar por abordar la seguridad, la economía y el impacto ambiental de los trenes del futuro. Esas máquinas que vuelan sobre guías elevadas a 480 kilómetros por hora crearán campos electromagnéticos que dejarán sentir su acción sobre los pasajeros y los sistemas electrónicos de los automóviles que circulen por autopistas cercanas. La preocupación por la seguridad se aupó al primer plano tras el incendio, el año pasado, del tredesmag experimental del Japón.

Algunas empresas relacionadas con la industria de la defensa ven en ese proyecto una salida a su potencial laboral en tiempos de paz; entre ellas, Grummann. Y por supuesto, los ingenieros de los proyectos iniciales que han tenido que guardar sus planos adormecidos en los anaqueles, de donde han empezado a sacarlos y refinarlos con la incorporación de medios superconductores y sistemas criogénicos para refrigerar los imanes.

Pero el patriotismo no parece reñido con las necesidades urgentes. Se espera que el primer tredesmag comercial de alta velocidad del mundo entre en funcionamiento en Florida en 1995, con técnica alemana no superconductora. La empresa Maglev Transit, con inversores japoneses, alemanes y norteamericanos, ha comenzado a reunir un paquete de financiación superior a 500 millones de dólares para adquirir la tecnología del Transrapid alemán. El vehículo cubrirá un recorrido de 22 kilómetros entre el aeropuerto de Orlando y Disneylandia, en siete minutos escasos.

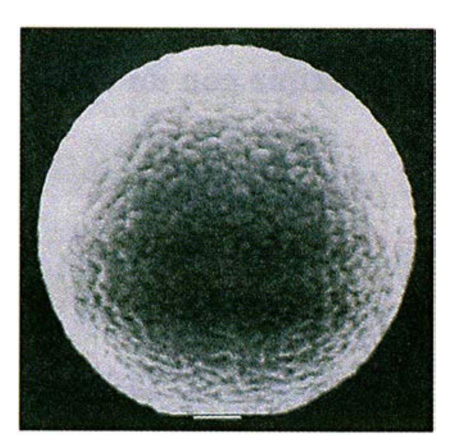
Algunos prefieren otras soluciones más viables a corto plazo: la técnica TGV francesa o el remozamiento del tendido actual de los ferrocarriles nacionales. El TGV y otros trenes de alta velocidad de propulsión eléctrica alcanzan velocidades superiores a los 320 kilómetros por hora sobre vías de acero convencionales de alta calidad.



VEHICULO DE DESLIZAMIENTO MAGNETICO en una instalación japonesa de pruebas. Foto: T. Matsuyomo/Sygma.

Su forma, ensayada en túnel aerodinámico, control por ordenador y algunas veces coches acondicionados a la presión, les confieren un notable parecido con un avión moderno. El Shinkansen japonés hizo su primer recorrido a mediados del decenio de 1960 y, desde entonces, cientos de millones de pasajeros han viajado en el tren bala.

Las empresas francesas, alemanas y suecas han movido todos los hilos, afinidades políticas incluidas, para promover sus opciones por diferentes países. Con dispar éxito. Entre las resistencias que encuentran no suelen faltar las de los intereses de las líneas aéreas regionales, las más afectadas por la competencia.



MICROESFERAS que encierran y liberan fármacos en respuesta a la variación de la acidez. II.

Farmacoterapia

¿Inyecciones o grageas?

El salmón a la parrilla, los filetes y la barbacoa no son ningún problema para el estómago medio. Tampoco lo constituyen proteínas de la importancia clínica de la insulina, los factores de crecimiento o los estimulantes de células sanguíneas. La digestión tritura esos agentes en fragmentos carentes de eficacia médica. Por consiguiente, aquellos a quienes se les ha recetado tendrán que someterse a la inyección subcutánea, intramuscular o intravenosa.

Pero cada vez está más cerca la administración oral de proteínas digeribles. Clinical Technologies Associates (CTA), empresa pequeña del sector de la biotecnología con sede en Elmsford, ha dado con una forma de proteger del tubo digestivo las proteínas y otros compuestos no disponibles oralmente, para dejarlas libres cuando se posee la seguridad de que han pasado ya al torrente circulatorio.

La clave reside en un proceso de fabricación de cápsulas de aminoácidos, los elementos componentes de las proteínas, que se abren en respuesta a las variaciones de acidez. CTA enlaza los aminoácidos entre sí en "proteinoides", una configuración bifurcada e insólita que facilita su mutuo anudamiento y escapa a la degradación. Las esferas protegen al fármaco del ambiente agresivo del intestino; su mínimo tamaño les permite cruzar la barrera de la mucosa.

Para encapsular el fármaco, CTA disuelve los proteinoides en agua y mezcla la solución con una proteína de interés terapéutico disuelta en una solución de bajo *p*H (por lo común, ácido cítrico o acético). La repentina acidez hace que los proteinoides se agreguen en esferas huecas del tamaño de un eritrocito, encerrando así algo del fármaco disuelto. Las cápsulas permanecen selladas en el entorno ácido del estómago. Pero cuando pasan al torrente sanguíneo, el *p*H más alto provoca la apertura de los proteinoides y la salida del contenido.

La compañía ha fabricado microesferas de diverso tamaño y sensibilidad al *p*H: desde el neurotransmisor dopamina, cuyo peso es de 150 daltons, hasta la insulina, de 6000 daltons, e incluso una vacuna patentada que pesa unos fantásticos 2,5 millones de daltons. Se desconoce todavía el mecanismo mediante el cual los proteinoides transportan los fármacos a través de las paredes intestinales hasta el torrente sanguíneo. Y falta acometer las pruebas clínicas en humanos, aunque se ha experimentado abundamente en mamíferos.

De lo que no hay escasez es de candidatos al encapsulamiento. Las agujas hipodérmicas son todavía el único medio de administrar las proteínas recetadas. La diabetes o la anemia causada por diálisis del riñón, entre otras enfermedades crónicas tratadas mediante inyección e infusión de proteínas corrientes, ofrecerían mercados de billones de pesetas si los fármacos prescritos (insulina y eritropoyetina) se pudieran dar por vía oral.

Biotecnología

De la copia al diseño

En un comienzo, la industria biotecnológica se limitaba a copiar proteínas biológicamente activas que fabrica el organismo; los productos servían para corregir deficiencias o estimular procesos biológicos. La próxima generación de fármacos se adivina más potente. Los compuestos con "antisentido" que se están preparando podrán bloquear la expresión de ciertos genes. Puesto que muchas enfermedades resultan de la expresión indebida de ciertos genes, los promotores cifran el mercado de las terapias antisentido en cantidades astronómicas.

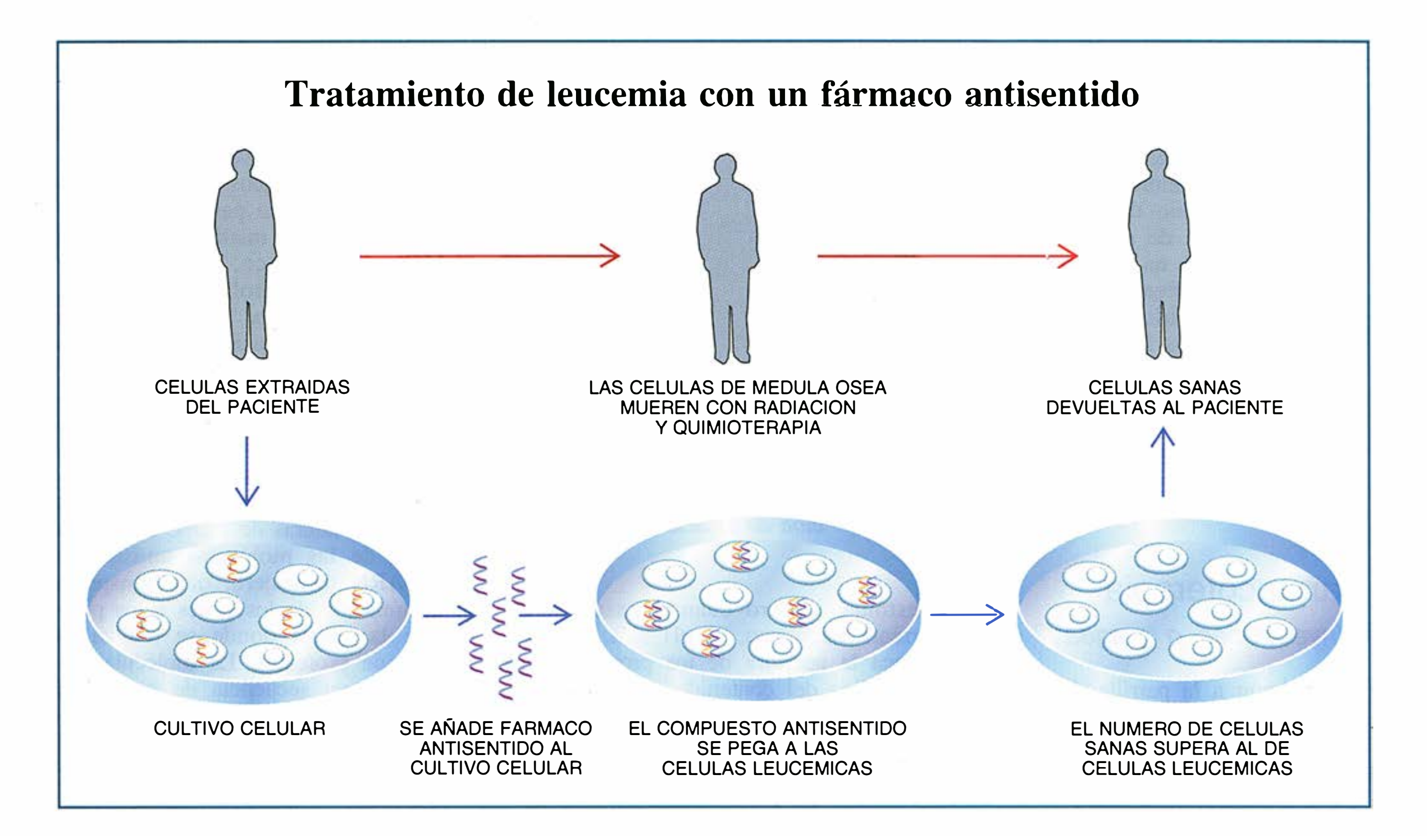
La Administración de Medicamentos y Alimentos (FDA) dio recientemente su aprobación provisional para los primeros ensayos clínicos de un producto antisentido, indicado para el tratamiento de la leucemia mielogénica crónica (LMC). El fármaco, patentado por Genta, inhibe la proliferación de las células que tienen la "translocalización de Filadelfia", mutación cromosómica que produce LMC.

Los compuestos antisentido son cortos segmentos de ADN unicatenario que se engarzan en los ácidos nucleicos sirviéndose del mecanismo de emparejamiento complementario que traba entre sí dos hebras de ADN. El blanco favorito de las moléculas antisentido es el ARN mensajero, que transporta la información de los genes a los puntos de la célula donde se realiza la síntesis de proteínas. La molécula antisentido cuya secuencia de bases sea complementaria a la del ARN mensajero se enlazará con éste e impedirá que la célula produzca una determinada proteína.

Aunque podemos emplear ADN natural como agente antisentido, el interés comercial se centra en analogías sintéticas del ADN que sustituyen el fosfato de la espina dorsal de la molécula por algo más resistente a las enzimas indeseables que podrían destruir el fármaco. De las muchas espinas dorsales químicas que se han investigado, dos clases parecen las más prometedoras: los metilfosfonatos, iniciados por Paul O.T. Ts'o, bioquímico de la Universidad Johns Hopkins, y fosfotioatos, desarrollados en buena medida por Jack S. Cohen, de la Universidad de Georgetown.

El producto de Genta contra la LMC, un metilfosfonato, se halla en fase de ensayo en células humanas de pacientes de LMC. De cumplirse lo previsto, el fármaco se usará al principio en combinación con trasplante autólogo de médula ósea. Las células de médula ósea extraídas de pacientes escogidos se tratarán con el compuesto antisentido con el propósito de suprimir las células leucémicas. Mientras tanto, las células que quedasen en la médula ósea del paciente se eliminarán mediante radioterapia y quimioterapia. Las células sanas cultivadas se reimplantarán, luego, al paciente. El avance de la técnica habrá de ayudar a precisar la cuantía de células sanas y leucémicas en los cultivos durante el tratamiento.

Los defensores de los metilfosfonatos antisentido propugnan que pueden bloquear formas mutantes, y, por ende peligrosas, de los oncogenes. Por su parte, los abogados de los fosfotioatos se aprestan para combatir con éstos el



papilomavirus, y dicen haberlos usado para curar una enfermedad de ojos herpesvírica en experimentos con ratones. Ambos enfoques, sin embargo, fallan en ciertas pruebas de actividad.

Habrá que superar muchos obstáculos antes de que cualquiera de los tipos de compuesto antisentido logre transformarse en poderosa medicina; por ejemplo, hallar compuestos estables y solubles que pasen fácilmente a las células sin desencadenar reacciones inmunes. Las respuestas inmunes al ácido nucleico pueden causar lupus eritematoso sistémico, enfermedad de desenlace fatal.

Varias compañías han cambiado el enfoque de manera radical y trabajan en compuestos antisentido en los que no sólo se ha modificado la espina dorsal, sino también las bases y los azúcares del ADN. Los argumentos sobre la composición química no parecen frenar la investigación. La primera generación de compuestos antisentido ha alcanzado la fase clínica, pero viene detrás una nueva ola de productos mucho más atractivos.

Análisis económico

Discreto mutis de la burguesía

Aunque un poco tarde, también en España la eclosión de los grandes almacenes, con sus cupones de ahorro del hogar, canjeables por toallas y vajillas, creó la sensación, avanzados los sesenta, de que todo el mundo se había pasado a la clase media. Ese convencimiento era realidad en tres cuartas partes de la población norteamericana; además, treinta años después de la segunda guerra mundial, la distribución de la renta familiar se había mantenido sin apenas cambios.

La estabilidad de la clase media intrigaba a los economistas, recuerda Greg J. Duncan, de la Universidad de Michigan. Las expansiones y las recesiones no parecían afectarle. Algunos salían de la pobreza y otros tantos caían en ella; unos se hacían ricos y otros, en parejo número, descendían de clase. Ni mayores ni menores impuestos alteraban las rígidas proporciones demográficas de los tres estamentos: ricos, clase media y pobres.

Así ocurrió hasta los años ochenta. Pero de entonces acá se han producido cambios tan bruscos en la distribución de ingresos familiares, que los economistas se hallan ahora más perplejos ante la disparidad de renta que lo estaban con la estabilidad precedente. La clase media, que durante decenios comprendía aproximadamente el 75 por ciento de la población adulta, se ha encogido en casi un 10 por ciento.

Tymothy M. Smeeding, de la Universidad de Siracusa, Willard Rodgers, de la de Michigan, y Duncan han seguido la pista a las transiciones económicas en el seno de un grupo de 7300 familias cuyos miembros son objeto de estudio desde 1968. Hasta 1980, los tránsitos hacia la clase media, o los operados a partir de ella, se compensaban entre sí, dejando el tamaño relativo de cada bloque de ingresos casi inmutable. Por ejemplo, durante esos años, un adulto de "clase media" —que ganaba entre 18.500 y 55.000 dólares anuales de 1987— tenía una probabilidad del 6 por ciento de ingresar en la clase alta en un plazo de tres años, y la misma de descender a la clase baja. Al mismo tiempo, el 31 por ciento de los adultos de clase alta perdería la gracia económica al mismo tiempo que un 35 por ciento de los adultos de clase baja ascenderían a la relativa comodidad de la media.

Sin embargo, desde 1980, los ritmos de salida desde la clase media han aumentado apreciablemente: un 2 por ciento más de gente ha subido al segmento alto de ingresos y un 30 por ciento más han bajado al escalón económico inferior.

Contemporáneamente, hay menos personas que, desde el grupo de ingresos alto o desde el bajo, se vayan incorporando al medio, con lo que la reducción de éste se acelera todavía más. Duncan y sus colegas estiman que, entre 1980 y 1986, alrededor del 30 por ciento de los que estaban en la clase baja podían saltar a la media, dentro de un intervalo de tres años; el 27 por ciento de los que se encontraban en el reino de ingresos altos podían esperar que sus circunstancias se redujeran considerablemente.

La causa principal de la erosión de la clase media estriba en el cambio de estructura del mercado laboral. Los empleados de nivel alto —la mayoría de los cuales ha cursado al menos un

primer ciclo universitario— ganan más, mientras que los empleados de nivel inferior ganan menos en términos relativos. La distancia entre los que ganan más y los que ganan menos ha venido ensanchándose desde los años sesenta, pero el ritmo de separación comenzó a acelerarse a finales de los setenta. Peter Gottschalk, del Boston College, llama a este resultado una "ola gigante de desigualdad" en los ingresos.

Aunque la diferencia de ingresos constituyó en la última década un fenómeno global, la distribución de la renta en otros países se alteró menos que en los EE.UU. La diferencia, afirma Duncan, debe buscarse en la estructura de la seguridad social norteamericana, mucho menos desarrollada. En Europa, los asalariados tuvieron que apretarse el cinturón durante la recesión de comienzos de los ochenta, pero los ingresos familiares estaban protegidos por ayudas gubernamentales. La expansión registrada mediada esa década no ayudó a mejorar la situación de los norteamericanos pobres. Los apreciables aumentos en horas de trabajo entre los pobres fueron compensados por una disminución inflacionaria de los salarios reales.

De la comparación entre los EE.UU. y Europa se infiere que, en ambas regiones, las familias pobres experimentan la misma cantidad de variación en sus ingresos de un año a otro, si bien el nivel básico alrededor del cual varían los ingresos es más alto en Europa. Menos del 3 por ciento de las familias europeas ganaron menos del 50 por cien de la mediana de ingresos durante varios años seguidos, comparado con un 14 por ciento de las norteamericanas.

Algunos economistas han hablado de la mayor desigualdad norteamericana en la distribución de la renta. Cierto es que también hay más diferencia geográfica y racial interna que en Europa. No obstante, incluso las zonas de ingresos más altos de los EE.UU. tienen tasas de pobreza mayores que las de todas las naciones europeas excepto las más pobres. Rumanía o Bulgaria podrían tener porcentajes similares de pobreza, pero su nivel es difícilmente un modelo al cual aspire la nación más rica del mundo.

Aun cuando se eliminara de los cálculos a los negros, el grupo racial con más alto nivel de pobreza, los Estados Unidos siguen teniendo una tasa de pobreza doble de la europea, al tiempo que los norteamericanos pobres trabajan tanto como los de las naciones europeas, si no más.

Podemos seguir el éxodo de la parte baja de la clase media y ver que la culpa recae sobre la escasa ayuda gubernamental a la familia pobre. Pero ¿a qué obedecen las discrepancias en el sector alto de la clase media? De acuerdo con los datos recogidos por Duncan, Smeeding y Rodgers, la historia allí no ha cambiado: "Al chico del pueblo le va bien." Aunque el ingreso de dos carreras está empujando a un creciente número de familias por encima del umbral de la clase alta, los salarios mayores que ganan los varones explican el grueso de la migración hacia arriba. Además, muchos están subiendo simplemente porque el sueldo del 10 por cien superior de los asalariados es ahora al menos 3,8 veces el del 20 por cien inferior, comparado con sólo el 2,6 hace 25 años.

¿Quedaría en minoría la clase media? Las cifras actuales sugieren que no hay peligro de ello, al menos antes de finales de siglo. No obstante, la tendencia parece ominosa. Los trabajos bien remunerados de los profesionales y los bajos ingresos de las masas menos preparadas van achicando ese colchón de toda democracia estable.

Expo 92

¿Quién mueve los hilos?

La Exposición Universal de Sevilla constituye un gigantesco escaparate de la civilización contemporánea en el que se exhiben pueblos, estilos de vida, conquistas de la humanidad. Sin embargo, al sumergirse en el complejo entramado de la Expo'92, pocos se detendrán a pensar que nada de esto sería posible sin un sistema ubicuo, omnipresente, pero oculto, de gestión de la información, en todas sus formas: voz, datos, texto, imagen.

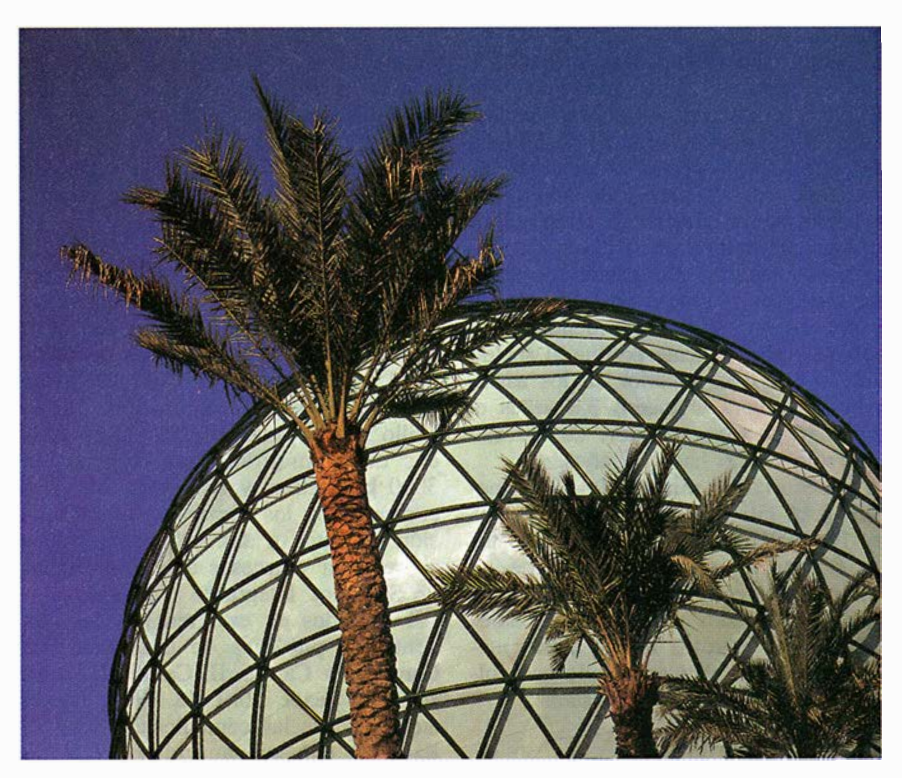
En 1987 se redactó un Plan de Informática y Telecomunicaciones que posteriormente se ha aplicado a las diferentes áreas: control de accesos, seguridad, control de operaciones, acceso a información, telecomunicaciones, televisión, servicios bancarios, comerciales, etcétera. Para llevarlo a su cumplimiento, Telefónica ha preparado la infraestructura de telecomunicaciones necesaria. Han colaborado también otras empresas privadas (IBM, por ejemplo) e instituciones públicas (Universidad de Sevilla). IBM y la universidad hispalense han unido sus esfuerzos en la creación de un centro de tecnología del lenguaje, que se dedicará durante la Exposición y después de la misma a experimentar y desarrollar técnicas de reconocimiento y síntesis de voz aplicadas a la lengua española.

Redes y servicios de telecomunicación. La red proyectada por Telefónica responde a una "opción de máximos", es decir, parte del supuesto de no poner límites a las demandas potenciales y se propone atenderlas con el grado de fiabilidad y calidad que dictan las normas internacionales. Por añadidura, tal infraestructura ha de tener un carácter permanente, pues se pretende que la Isla de La Cartuja se convierta en un parque tecnológico de Sevilla una vez finalizada la Expo'92.

Red telefónica pública. La red telefónica local consiste en un anillo de cables de transmisión digital por fibra óptica, duplicado por motivos de fiabilidad, que recorre todos los pabellones y edificios de la Exposición. Dicho anillo se compone de 800 fibras ópticas cuya longitud total supera los 3000 kilómetros, y está preparado para cursar todos los servicios de transmisión de datos a alta velocidad, videoconferencia y accesos a la Red Digital de Servicios Integrados (RDSI).

Los nodos de esta red son las dos centrales públicas de conmutación: Cartuja I y Cartuja II. Cartuja I, ya en servicio desde abril de 1991, puede atender todas las comunicaciones de la Expo'92 con su capacidad actual de 10.000 líneas y admite ampliación hasta 40.000 en el futuro para utilizarse posteriormente como una central más de Sevilla. Incorpora, por primera vez en España, todos medios de la Red Digital de Servicios Integrados: accesos básicos (2 canales B de 64 kbit/s + 1 canal D de 16 kbit/s) y accesos primarios (30 canales B + 1 canal D), con lo que puede admitir comunicaciones simultáneas de voz, datos, mensajes e imágenes. En cuanto a la segunda central, Cartuja II, se trata de una exacta réplica de la primera destinada a servir de reserva en caso de fallo. Con tal propósito, todas las líneas de usuario están conectadas a ambas centrales pero a través de rutas y canalizaciones distintas (más de 400 km de conductos tendidos) que aseguran un eficaz encaminamiento alternativo del tráfico saliente y del tráfico entrante en tal contingencia, sin que haya siquiera de modificarse la numeración inicial de las líneas.

Las telecomunicaciones no se circunscriben al recinto de la Expo, sino que han de acceder al mundo exterior. Esta red local, pues, ha de integrarse con las redes nacionales e internacionales, y ello se verifica a través de dos vías independientes que enlazan el anillo digital de La Cartuja con el anillo urbano, también de fibra óptica, de la ciudad de Sevilla. Estas vías realizadas con cables de 64 fibras ópticas tienen por separado capacidad de cursar todo el tráfico de telecomunicaciones de la Expo, por lo que pueden prestarse mutua ayuda en caso de emergencia; vías que se refuerzan con un radioenlace digital que actúa como reserva para las mismas funciones.



La esfera bioclimática

El fuerte aumento de tráfico de telecomunicaciones que va a originar la Exposición ha de ser atendido por nuevos medios. De ello es exponente el nuevo centro de comunicaciones por satélite establecido por Telefónica en Carmona (próximo a Sevilla), inicialmente equipado con cuatro estaciones terrestres para cursar el tráfico internacional de telefonía, telegrafía, datos y otros servicios comerciales que se transmite y recibe en la zona de Sevilla, mediante el acceso a los sistemas de satélites *Eutelsat* e *Intelsat*, de cobertura europea y mundial respectivamente. Asimismo, este centro de comunicaciones por satélite será utilizado para emisión y recepción de programas de televisión. La compañía estatal de telefonía ha establecido también el Centro Internacional de Pineda, provisto de una central internacional digital, un telepuerto con acceso a los referidos sistemas *Eutelsat* e *Intelsat*, un gran centro internacional de transmisión y un nodo de enlace con la red internacional IBERMIC.

Redes de comunicaciones privadas. Las comunicaciones entre las distintas entidades de organización y administración que operan en el recinto de la Expo'92 están atendidas por catorce centralitas digitales HICOM de Siemens, que dispondrán de todas las posibilidades de la RDSI.

Por otro lado, se hará un uso muy intenso de los sistemas de radiocomunicación que especialmente se han previsto, a saber:

–La telefonía móvil automática (TMA), que permite comunicaciones entre usuarios provistos de terminales telefónicos móviles, así como entre éstos y los usuarios del servicio telefónico convencional. Se utilizará el sistema TMA-900 (en la banda de 900 megahertz) con preferencia al TMA-450 por su tamaño y peso mucho más reducido. La condición necesaria será disponer de terminales homologados en España. También se pondrá en funcionamiento, con carácter demostrativo, el sistema de radiotelefonía digital celular paneuropea denominado GSM, que al mismo tiempo funcionará en los Juegos Olímpicos de Barcelona. La zona cubierta por TMA será el recinto de la Expo'92 más la ciudad de Sevilla y sus rutas de salida.

–La radiobúsqueda o radiomensajería, por el cual los usuarios pueden recibir en un receptor de bolsillo avisos señalizados o mensajes alfanuméricos procedentes de un teléfono cualquiera.

–La radiotelefonía de grupo cerrado ("trunking"), por la cual la Comisión Organizadora ofrece a todos los participantes el acceso a un sistema de comunicaciones vía radio en el que todos los canales (frecuencias) son compartidos por los grupos cerrados registrados en el mismo, de tal modo que el sistema asigna automáticamente un canal libre a cada comunicación que se solicite. La cobertura del servicio se extiende también hasta la ciudad de Sevilla y alrededores.

Servicios de telecomunicación para visitantes. Son fundamentalmente los puntos de información no asistida, las cabinas públicas para uso de la red telefónica y las sesiones de televisión (convencional y de alta definición).

Existe un total de 35 puntos de información no asistida (PINA) repartidos por todo el recinto, que puede manejar personalmente el visitante para obtener informaciones sobre la Expo, enviar o recibir mensajes personales de otros visitantes, reservar plazas en restaurantes, etcétera. Cada PINA está ubicado en un quiosco y contiene 6 monitores de pantalla. Todos ellos está interconectados y enlazados a su centro de control a través de una red local en anillo con paso de testigo ("token-ring") a 16 Mbps sobre fibra óptica multimodo.

Telefónica ha instalado cerca de 1000 teléfonos públicos por toda la Expo, con posibilidad de utilizar tarjetas de prepago y facilidades de cobro revertido. Se han dispuesto además cuatro salas de telecomunicaciones en los lugares más concurridos, una de ellas con instalación de videoconferencia.

En cuanto a televisión, se ha creado una sociedad mixta entre Expo'92, RTVE y RTVA para producir y explotar todos los programas y servicios de televisión relacionados con esta Exposición, ofreciendo elementos técnicos, estudios y unidades móviles para atender necesidades de los diversos medios de comunicación.

Por otra parte, la sociedad Retevisión construye un centro de transmisión y recepción de señales de televisión, donde expondrá los últimos avances tecnológicos en la materia y desde el que distribuirá a todos los edificios y pabellones, por una red propia, los programas de televisión recibidos en Sevilla, ya sea por vías tradicionales o por satélite; asimismo se encargará de retransmitir a las redes de TV nacionales e internacionales los programas generados en la Expo'92.

Un último capítulo, de especial importancia por su novedad, es la televisión de alta definición (TVAD). Retevisión prepara, dentro de su pabellón en la Expo'92, un estudio de 400 m^2 dedicado a la producción de programas de TVAD, que desde allí serán distribuidos a los pabellones de los países miembros de la CEE y a unos 200 puntos de demostración distribuidos por Europa. Este estudio de TVAD será el primero de su clase en este continente, y podrán utilizarlo productores de televisión que sigan la norma establecida. Los programas de TVAD serán contemplados por el público en una sala de proyección especial.

Taller y laboratorio

Douglas Smith

Cómo generar el caos en casa

Casi todo el mundo rehúye el caos. Al fin y al cabo, ¿a quién puede agradarle quedarse atrapado en un aeropuerto nevado en vísperas de Navidad? Pero a mí el caos me relaja, especialmente cuando puedo observarlo y controlarlo. El caos forma parte de la belleza de la naturaleza. Está en la corriente de un río, en la oscilación de un péndulo, en la dinámica de las nubes.

Uno de los mejores procedimientos para experimentar con el caos es construir un circuito como el ilustrado en la figura inferior, que nos sirve de paradigma de sistema caótico. Sometido a determinadas tensiones eléctricas, el circuito genera una señal caótica.

El primero en estudiar rigurosamente su comportamiento fue, en 1981, Paul S. Lindsay, del Instituto de Tecnología de Massachusetts. Desde entonces, numerosos físicos han intentado explicar de qué modo se genera caos.

Cuando tuve noticia de los experimentos de Lindsay, me impresionó el hecho de que un circuito tan sencillo pudiera comportarse de manera tan complicada e interesante. Yo ya había visto simulaciones de sistemas caóticos producidas por ordenador, pero este caso me ofrecía una ocasión para estudiar directamente la dinámica caótica de la naturaleza. Como aficionado a la ciencia, decidí que me era necesario ver el caos por mí mismo. Y, con una pizca de suerte, incluso descubrí un procedimiento para escucharlo.

Para construir el circuito no se necesitan más que algunos componentes electrónicos elementales (una resistencia, una inductancia y un diodo). Recomiendo comenzar con una resistencia de 200 ohms y una inductancia de 100 millonésimas de henry (el henry es la unidad de inductancia). Respecto al diodo, he descubierto que hay muchos que aquí pueden funcionar bien, entre ellos los 1N4001, 1N4004, 1N4005 y 1N4007. Un puñado de resistencias, inductancias y diodos vale poco dinero; los venden en las tiendas de suministros electrónicos.

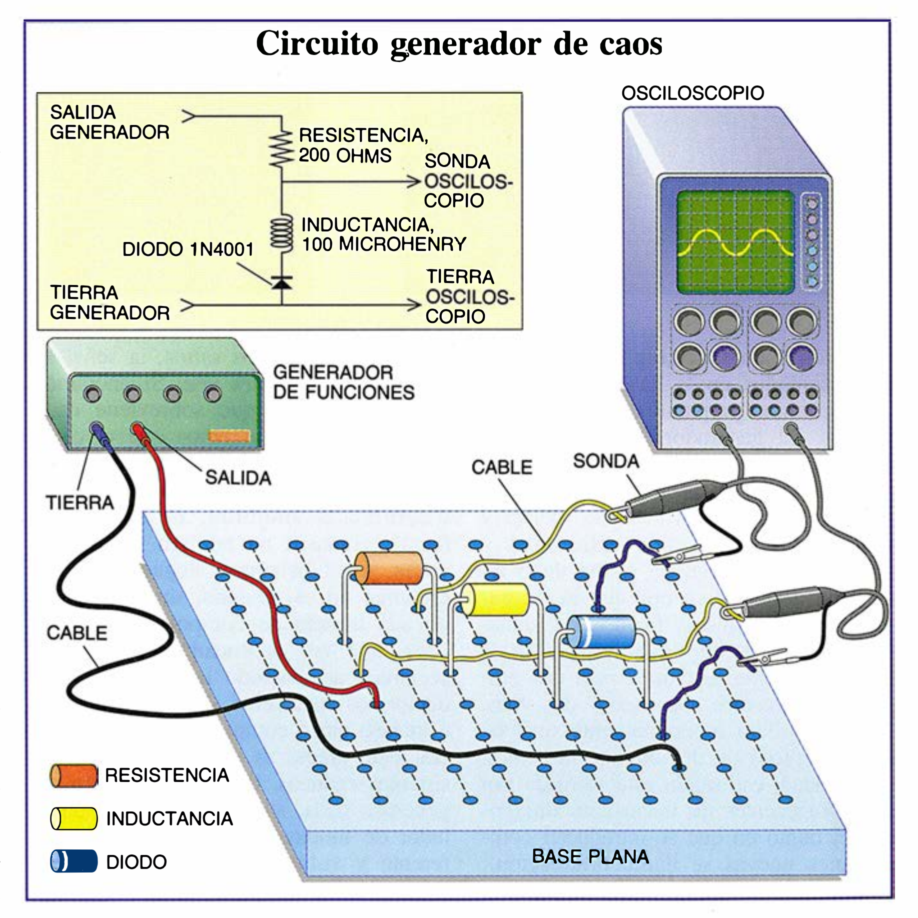
El circuito puede montarse sobre una base plana, o soporte de plástico con hileras de orificios en los que alojar componentes. Se necesita además un generador de funciones para producir la señal de entrada. Para medir y estudiar la salida del circuito lo mejor es un osciloscopio. Quien no disponga de generador de funciones u osciloscopio de su propiedad, probablemente podrá gestionar un permiso para utilizarlos en el departamento de física o tecnología de alguna escuela o facultad que le quede cerca.

Mi deseo era disponer de un osciloscopio propio para realizar los experimentos en casa, pero el precio de uno nuevo lo ponía fuera de mi alcance. Confiando en conseguir uno usado, puse una nota en el tablón de anuncios del Laboratorio Nacional de Argonne. Al cabo de una semana, se puso en contacto conmigo alguien que trabaja reparando alarmas contraincendios y que casualmente tenía un osciloscopio a la venta. Me invitó a echar un vistazo a su taller. El lugar rebosaba de piezas de electrónica: ordenadores desmontados, antenas viejas, radios desarmadas, fuentes de alimentación amontonadas. Comprendí que me hallaba donde yo debía buscar. Conseguí un osciloscopio de 15 años por la décima parte de lo que me hubiera costado uno nuevo.

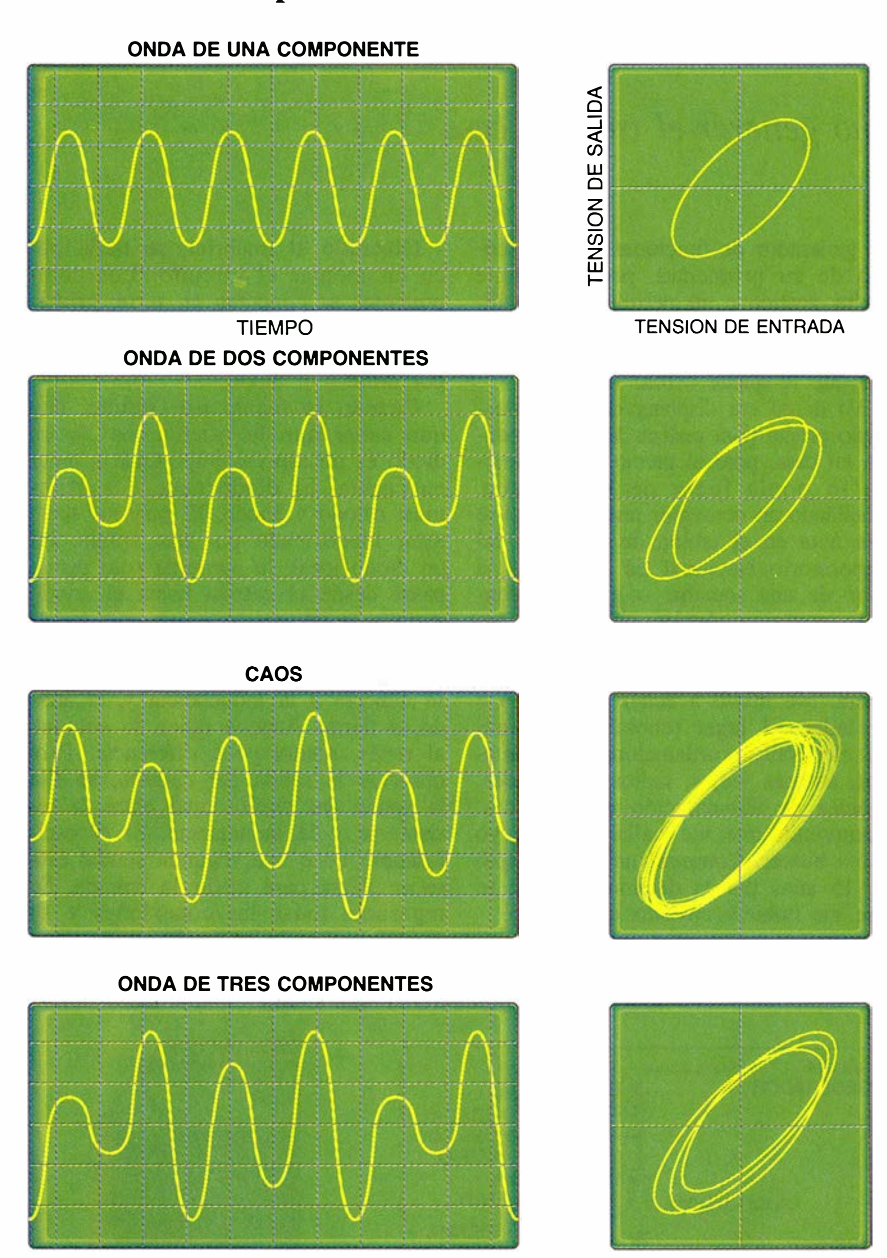
Obtenido el material, se tarda poco en montar el circuito. Los componentes se conectan en serie: primero el generador; a continuación, la resistencia; le sigue la inductancia, y, por último, el diodo.

Cuando se monta un circuito, hay que saber que la orientación de un diodo es un aspecto importante a tener en cuenta. El diodo tiene dos extremos: cátodo y ánodo. El primero suele estar identificado por una franja. En un diodo ideal, la corriente sólo puede pasar desde el cátodo hacia el ánodo y no a la inversa.

Al montar por primera vez el circuito caótico, recomiendo que el cátodo se conecte a la inductancia y, el ánodo, a tierra. Aunque quien lo coloque al revés, notará poca diferencia. Para observar la salida del circuito, se fija la sonda del osciloscopio entre la resistencia y la inductancia. Si el osciloscopio tiene una segunda sonda, ésta se empleará para medir la entrada. Se repasarán todas las conexiones y se



Respuesta del circuito de caos



comprobará que los componentes están bien asentados en la base.

Ya estamos preparados para explorar el caos. El generador de funciones se ajusta para que produzca ondas sinusoidales de una frecuencia del orden de dos millones de ciclos por segundo (hertz) y una amplitud que varíe entre +0,1 y –0,1 volts. La señal de salida debe tener una amplitud menor que la de entrada, pero la misma frecuencia. Lentamente se aumenta la amplitud de la señal de entrada. Entonces, para una amplitud comprendida entre uno y dos volts, el circuito dará repentinamente una salida con picos de dos alturas diferentes. En realidad, esa salida está formada por dos componentes de frecuencias diferentes. El punto en que se introducen componentes nuevas se llama bifurcación.

Conforme sigamos aumentando la amplitud a pequeños saltos, la señal se bifurcará una y otra vez. Si anotamos la amplitud a la que sobreviene cada bifurcación, observaremos que el cambio de amplitud entre bifurcaciones decrece en proporción geométrica. Para determinada amplitud, el sistema se habrá bifurcado un número infinito de veces, y así habremos llegado al caos. La señal no es aleatoria, sino una complicada mezcla de componentes.

Si, una vez desencadenado el caos, seguimos aumentando la amplitud, produciremos una señal de salida de tres e incluso cinco componentes en frecuencia. Este efecto es característico de los sistemas caóticos. Pero si el circuito no generase caos, sintonizaremos el generador de funciones a una frecuencia diferente y volveremos a probar. Si aun así seguimos sin ver el caos y estamos seguros de que todo lo demás está correcto, probaremos con un diodo de otro tipo. He advertido que los diodos que mejor resultan son los de gran capacitancia, magnitud cuyo valor aparece en la "hoja de datos" del componente.

A causa de las limitaciones del generador de funciones o del osciloscopio, podríamos encontrar difícil experimentar a frecuencias de dos o tres millones de hertz. Cambiando los componentes, podremos trabajar a frecuencias más bajas. Con un diodo 1N2858, una resistencia de 25 ohms y una inductancia de 0,1 henry, el circuito alcanzará el caos en torno a los 75.000 hertz.

El origen del comportamiento caótico del circuito está en el diodo. Un diodo ideal conduce sólo en un sentido y la corriente únicamente lo atraviesa si la tensión en el cátodo es inferior a la existente en el ánodo. En nuestro circuito el ánodo está conectado a tierra (cero volts); por tanto, si el cátodo tiene una tensión negativa con respecto a tierra, el diodo conducirá.

Los diodos reales difieren de los ideales. Si en el cátodo la tensión es positiva, el diodo actúa un poco a modo de condensador, es decir, la tensión entre sus extremos es proporcional a la velocidad de variación de la intensidad. De esta manera seguirá actuando hasta que la tensión en el cátodo llegue a –0,5 volts aproximadamente. Entonces se pondrá a conducir libremente, pero seguirá ofreciendo una cierta resistencia al paso de la corriente, manteniendo la tensión en torno a –0,5 volts. Si, entonces, la tensión en el cátodo cae por debajo de cero volts, no se corta inmediatamente. Durante un tiempo reducido, el diodo permite el paso de corriente y vuelve a funcionar como condensador.

Los circuitos que contienen diodos acostumbran diseñarse de modo que las propiedades no ideales de estos componentes queden anuladas. Pero en nuestro circuito experimental, lo que se hace es poner de manifiesto todas las propiedades del diodo.

Consideremos primero lo que ocurre si la entrada es una onda sinusoidal cuya amplitud varía entre +0,1 y –0,1 volts. En tales condiciones, la tensión en el cátodo no desciende por debajo de –0,5 volts y, por tanto, el diodo se comporta como un condensador. En este caso, el comportamiento del circuito es predecible. Cuando la entrada se ajusta a una onda sinusoidal de baja frecuencia, el condensador y la inductancia actuarán como una resistencia de gran valor, impidiendo que la corriente los atraviese. De este modo, la amplitud de la onda de entrada será igual a la de la onda de salida.

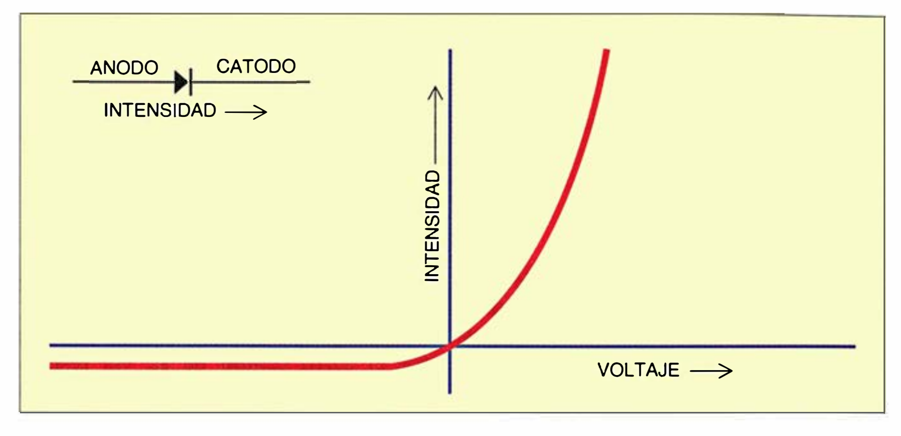
Cuando la frecuencia de la entrada se hace subir hasta un determinado

valor crítico, la inductancia y el diodo ofrecerán poca resistencia, con lo que permitirán el paso de corriente hacia tierra. Entonces la tensión de salida tenderá a cero. Cuando la frecuencia se hace subir o bajar desde el valor crítico, la amplitud de la salida aumenta hasta igualarse a la amplitud de la entrada.

La frecuencia crítica depende de la capacitancia del diodo y de la inductancia del circuito. Su valor es

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{(\text{inductancia} \times \text{capacidad})}}$$

donde la inductancia se expresa en henry y la capacidad, en farads. Si la inductancia vale 100 millonésimas de henry y la capacidad es de 50 billonésimas de farad, la frecuencia crítica valdrá del orden de 2,3 millones de hertz.



UN DIODO CONDUCE cuando la tensión en el cátodo es inferior a la tensión en el ánodo. Se muestra aquí la curva característica de un diodo corriente.

Ahora bien, si la amplitud varía entre +2 y –2 volts, el diodo puede comportarse de una de dos maneras: dejará pasar la corriente u operará como un condensador. Lo que haga depende de la tensión en el cátodo y del tiempo durante el cual se aplique esa tensión. A su vez, la tensión aplicada en el cátodo es función del modo en que la inductancia responda a la tensión de entrada. Y, aquí, el modo en que la inductancia responda depende asimismo de si el diodo está cargándose como un condensador o si se mantiene a –0,5 volts.

En palabras sencillas, la inductancia recibe un conjunto de instrucciones de la señal de entrada y otro conjunto de instrucciones del diodo. Si la secuencia y sincronía de las instrucciones son estrictamente correctas, el circuito puede seguir generando una señal periódica. Pero si se rompe el ritmo natural de las instrucciones, el circuito entra en el caos. Durante el último decenio, Roger W. Rollins y Earle R. Hunt, de la Universidad de Ohio, han trabajado en una simulación por ordenador que describe exactamente el comportamiento del circuito.

Quiero animar a los lectores a experimentar con el circuito una vez que dominen bien la manera en que trabajan sus componentes. Por ejemplo, pueden colocarse varios diodos y observar los correspondientes cambios en el comportamiento caótico. O también puede probarse a cambiar la frecuencia, la forma o el nivel en c.c. de la señal de entrada.

Podría además resultar interesante observar la señal de salida por otro procedimiento. Así, podemos representar gráficamente la salida en función de la entrada trabajando con el modo *x–y* del osciloscopio. (Con una sonda de éste se capta la señal de entrada y con la otra, la de salida.) Se verán así dos o más bucles en la pantalla del instrumento. En este modo, crece el número de bucles conforme aumenta el número de componentes en frecuencia.

A los lectores que gusten de las demostraciones espectaculares y no tengan a mano un osciloscopio, les recomiendo otra clase de experimento. Es posible oír el caos conectando el circuito a un equipo estéreo. Pero antes, hay que detenerse a pensar si la entrada al receptor puede con la salida del circuito; no es deseable descargar una corriente o una tensión excesivas sobre el receptor.

Para empezar deberemos confirmar que el generador de funciones produce las tensiones que realmente deseamos. Si la tensión de entrada al circuito es de cinco volts y la resistencia es de 200 ohms, la intensidad máxima debe ser de 25 miliampères. (La intensidad de la corriente es la tensión dividida por la resistencia.) Consultando el manual del usuario del estéreo, tendremos que averiguar si los canales de entrada tienen capacidad para cinco volts y 25 miliampères. Si no es así, podemos aumentar la resistencia del circuito.

Para conectar el circuito al estéreo, se empleará un cordón de conexión común con clavijas. Si lo cortamos por un extremo y pelamos éste, veremos un alambre y también un blindaje metálico o bien un segundo alambre. El primer alambre lo conectaremos a la salida del circuito. Luego, con un cable uniremos el blindaje a la tierra del circuito, o bien conectaremos a tierra el segundo alambre del cordón. Tras asegurarnos de que el estéreo está apagado, introduciremos la clavija en uno de sus canales de entrada.

Primero se ajusta el generador de funciones para que dé ondas sinusoidales de un volt y 1000 hertz aproximadamente. El mando de volumen se gira hasta un nivel bajo y entonces se enciende el estéreo. Ahí deberemos oír un sonido aproximadamente a dos octavas por encima del *do* central. Al aumentar la frecuencia, el sonido debe subir de tono. Pero al llegar a los 20.000 hertz más o menos, el sonido saldrá de nuestro campo auditivo. Seguidamente, incrementaremos la frecuencia hasta dos millones de hertz; entonces, no deberemos oír nada en absoluto.

Para llevar el circuito al caos, se aumenta poco a poco la amplitud de la entrada. La tensión no hay que elevarla por encima de cinco volts, a menos que el estéreo admita más de 25 miliampères. A medida que aumente la amplitud, el circuito generará una señal de dos componentes en frecuencia, luego de cuatro, luego de ocho y así sucesivamente; pero seguiremos sin oír nada. Pero cuando la amplitud aumente por encima del punto de inicio del caos, el estéreo silbará fuertemente. Ocurre que cuando el circuito se comporta caóticamente, genera una gama muy amplia de frecuencias, algunas de las cuales son audibles.

Podemos, pues, estudiar el caos con el oído. En general, cuanto mayor sea la amplitud de la entrada, más componentes en frecuencia oiremos. Sin embargo, para ciertas amplitudes, el circuito generará sólo tres o cinco componentes en frecuencia y el ruido cesará. No creo que el circuito caótico tenga mucho futuro como instrumento musical. Aunque, ¿quién sabe? Hay compositores que han escrito sinfonías con sintetizadores electrónicos. ¿Por qué no un concierto en *do* mayor para circuito caótico?

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

PERIOD DOUBLING AND CHAOTIC BEHAVIOR IN A DRIVEN ANHARMONIC OSCILLATOR. Paul A. Linsay en *Physical Review Letters*, vol. 47, n.º 19, págs. 1349-1352; 9 de noviembre de 1981.

CHAOS: MAKING A NEW SCIENCE. James Gleick. Viking Penguin, 1987.

THE ART OF ELECTRONICS. Paul Horowitz y Winfield Hill. Cambridge University Press, 1989.

Juegos matemáticos

Ian Stewart

Cálculo paralelo

La diferencia de longitud de dos curvas paralelas separadas una distancia fija no depende de sus formas. De eso trataremos hoy.

The Guardian, uno de los principales diarios británicos, justamente célebre por sus errores tipográficos, publica todos los lunes una sección fija, un consultorio donde los lectores plantean cuestiones, que otros lectores responden. Por alguna misteriosa recurrencia, ciertas cuestiones matemáticas muy manidas se repiten una y otra vez. Ejemplo:

–¿Qué fracción da el valor exacto de π?

Cualificados lectores proceden a explicar que tal fracción no existe y todos tan contentos. Otros problemas, por el contrario, siguen suscitando polémicas y abundante correo, incluso a pesar de haber sido correctamente resueltos. Uno de ellos, un auténtico fósil de las matemáticas recreativas, es merecedor de examen más atento:

–Dos automóviles recorren en sentidos contrarios la gran vía de circunvalación londinense (*M25*). El que circula por la vía interior recorre una distancia más corta. ¿Cuánto menor es, exactamente?

Podemos plantear la misma cuestión para la circunvalación de Madrid, salvo que en esta ocasión es el auto que circula en sentido contrario al de las agujas del reloj el que recorre mayor distancia, y ello debido a que los británicos circulan por la izquierda, como manda el sentido común, mientras el resto de Europa se empecina contumaz en llevar la derecha...

Supongamos que los coches circulan por el carril central de su vía respectiva, que la distancia que separa esos carriles sea 10 metros y que la longitud de la gran circunvalación sea 200 kilómetros. Las dos vías son curvas paralelas, sea el que fuere el sentido en que se las recorra, lo que significa que determinan siempre la misma distancia sobre cualquier perpendicular común, distancia que son 10 metros en nuestro caso.

Con estas hipótesis, la respuesta es que el auto que vaya por la vía exterior recorrerá unos 60 metros más.

¡Sorprendente resultado! Dos damas lo verificaron experimentalmente. Dieron con sus vehículos una vuelta completa en cada uno de los dos sentidos y hallaron que la diferencia no superaba el hectómetro. Otro lector opuso que las mujeres hubieran debido antes contrastar los odómetros de sus vehículos; al no hacerlo, sus resultados carecían de valor... aunque, la verdad, puesto que la respuesta correcta es de unos 60 metros, sus cuentakilómetros eran notablemente fieles.

Este resultado de 60 metros, contrario a la intuición, deja desconcertada a mucha gente. La diferencia parece demasiado pequeña, porque el coche que avanza en el sentido de las agujas "va dando la curva exterior" durante la totalidad de los 200 kilómetros.

Esta misma idea aparece en muchos otros rompecabezas clásicos, del tipo:

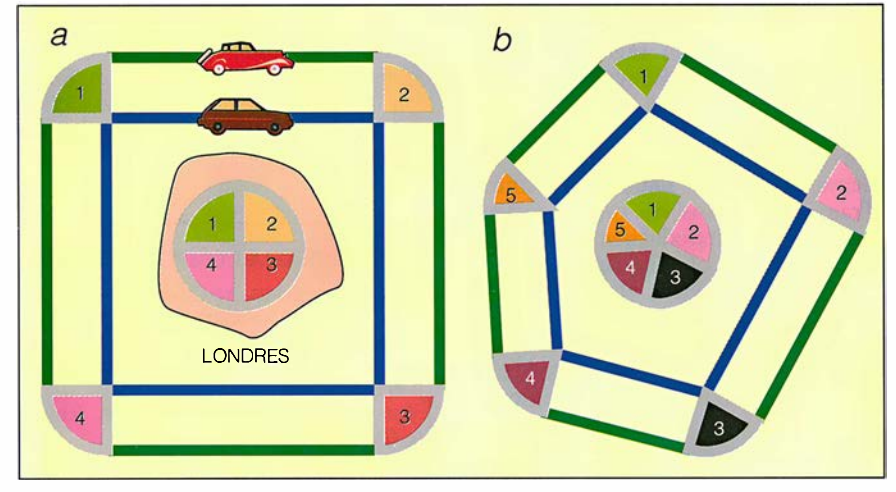
–Se contornea todo el ecuador terrestre con un cable a ras del suelo. Si la longitud del cable se aumentase en diez metros, ¿a qué altura habría que elevarlo uniformemente, para conseguir dejarlo tenso?

Respuesta: 10/2π, o sea, aproximadamente, 1,6 metros.

Esta vez la intuición juzga que esa altura es demasiado grande; ¡seguro que podríamos "absorber" los diez metros adicionales sin tanta holgura! Tal impresión es lógicamente coherente con el sentir de que, en el problema de la circunvalación, 60 metros es demasiado poco. Y ya que estamos, la solución del mismo problema planteado para la *M30* madrileña es también de unos 60 metros (con las mismas hipótesis, salvo por la longitud total, que ahora es de unos 30 kilómetros). ¿Y a qué es debido? ¿Llegamos a comprender cuáles han de ser las respuestas, y nos percatamos, en particular, de que forzosamente han de ser las mismas para la londinense *M25* que para la *M30* de Madrid?

Empecemos por el cable tendido alrededor de la Tierra. Supongamos que ésta sea una esfera perfecta de radio R. Cuando el cable está tendido sobre el suelo forma un gran círculo, cuya longitud es $2\pi R$. Si lo elevamos por igual una altura r sobre el suelo, todo alrededor del ecuador, su nuevo radio será $R+r$ y, por tanto, su longitud, $2\pi(R+r)$, diferirá de la inicial en $2\pi(R+r) - 2\pi R = 2\pi r$, resultado que no depende de R. Dicho de otro modo, la respuesta sería la misma si en lugar de la Tierra se tratase de Venus, del Sol, de la órbita de Saturno o de un guisante. ¡E incluso de un punto de radio nulo! Nos falta calcular la respuesta correcta: tenemos $2\pi r = 10$ metros, o sea, $r = 10/2\pi$, que son alrededor de 1,6 metros. El incremento en la longitud del cable es igual al perímetro de una circunferencia cuyo radio fuese la distancia del cable al suelo (dado que la solución no depende de R, podemos tomar R igual a 0).

Podemos "disimular" una longitud suplementaria cualquiera dejando que el cable ondule un poquito a un lado y otro. La intuición de que así será fácil perder una longitud arbitraria cualquiera resulta, probablemente, de esta posibilidad. Pero se trata de una posibilidad que tenemos vedada, pues



1. Incrementos de distancia correspondientes a un circuito interior cuadrado (a) *y a un circuito interior poligonal convexo* (b).

en tal caso el cable no estaría tenso, contrariamente a la hipótesis.

El mismo cálculo, aplicado a una *M25* ideal —un círculo perfecto— conduce a idéntica conclusión: la distancia suplementaria correspondiente a la vía exterior (la que corre en el sentido de las agujas del reloj; recordemos: Inglaterra) es la longitud de una circunferencia de radio igual a la distancia entre carriles, diez metros; así que será 10 × 2π, alrededor de 62,8 metros. Bien está, pero hay dos objeciones: (*a*) este cálculo no nos hace ver por qué produce el resultado exacto, y (*b*) como hicieron notar muchos lectores del *Guardian*, la *M25* no es una circunferencia. ¡A buen seguro que eso lo cambia todo!

¡Pues no cambia absolutamente nada! No pretendemos decir que se pueda seguir utilizando la fórmula $2\pi R$ (¿cuánto valdría R?), sino que existe un razonamiento más general aplicable a las curvas no circulares, que tiene a mayores la virtud de mostrar por qué es tan pequeño el aumento de longitud. Supongamos incialmente que la vía interior de la *M25* fuese un cuadrado.

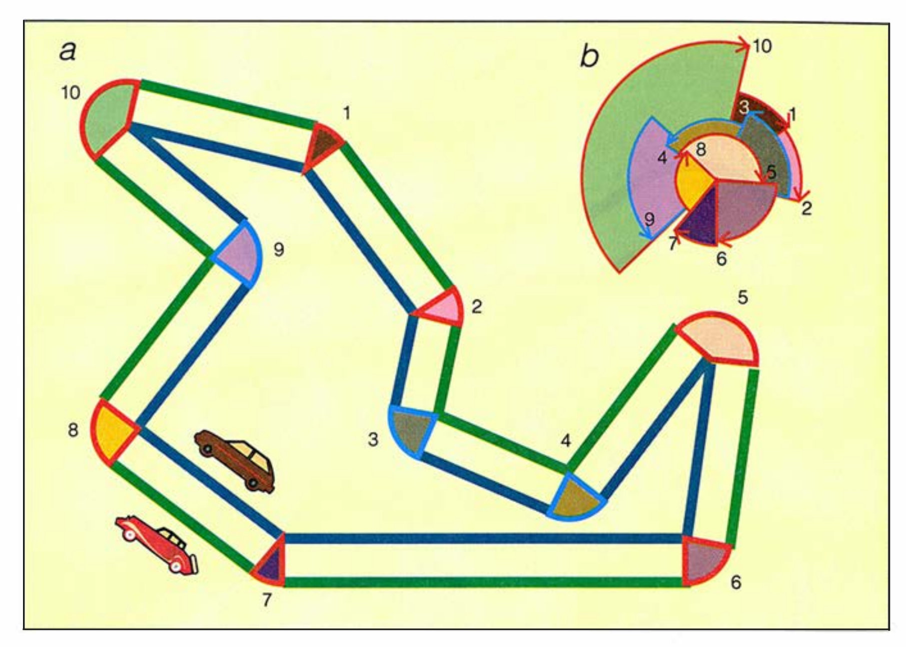
Tendremos entonces la situación representada en la figura 1*a*. El circuito interior está formado por cuatro segmentos rectilíneos iguales, mientras que el exterior consiste en esos cuatro segmentos más cuatro cuartos de círculo de diez metros de radio. El excedente de longitud corresponde, pues, a estos cuatro arcos de circunferencia, o sea, a la longitud de un círculo de radio diez metros, o lo que es igual, a 2π × 10 = 62,8 metros.

Una *M25* cuadrada nos lleva a la misma solución: la diferencia es una circunferencia.

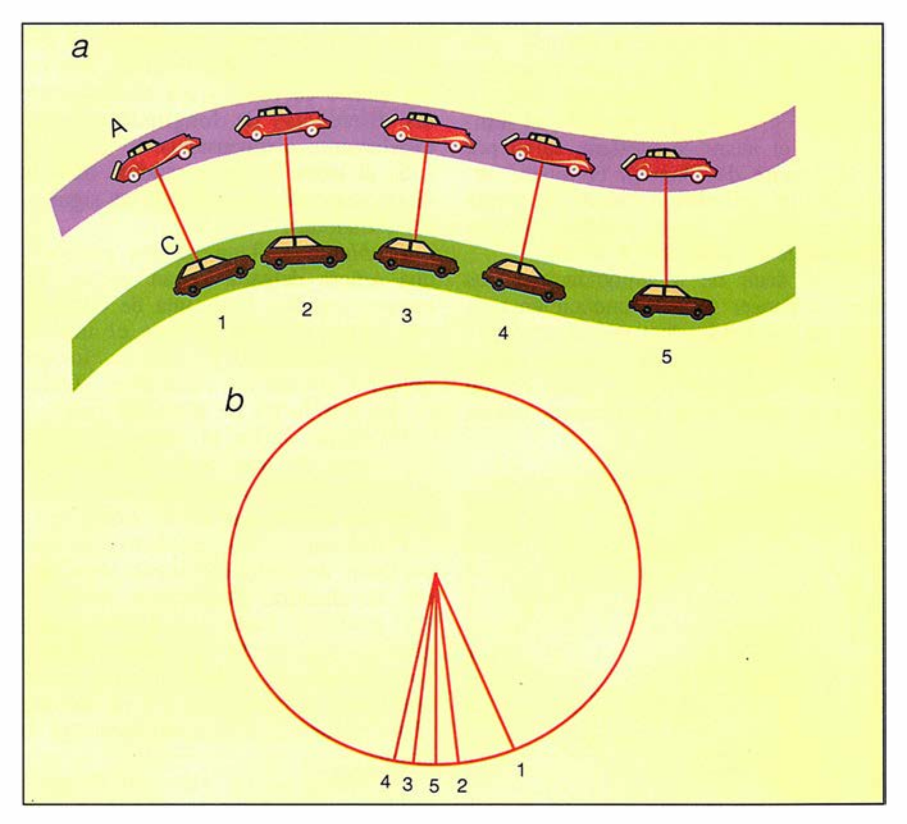
Pero, ¿no será mera casualidad? De serlo, resultaría bien sorprendente. Y no es ése el caso. Veamos qué sucede con un polígono convexo cualquiera, como el de la figura 1*b*. Lo mismo que antes, las longitudes adicionales correspondientes a los diversos ángulos pueden reunirse en una circunferencia de diez metros de radio.

¡De acuerdo! ¡Pero el circuito no es necesariamente convexo! Objeción rechazada: consideremos un polígono cóncavo como el de la figura 2. Cuando asociamos los arcos correspondientes a cada ángulo para obtener la distancia adicional total, es preciso sumar ciertos arcos y restar otros. La figura 2 nos muestra una vez más que hemos vuelto a completar una vuelta a un círculo con radio 10 metros. La razón es que la normal a los dos circuitos describe una vuelta completa sobre sí misma cuando se efectúa un recorrido completo, sean cuales fueren sus formas.

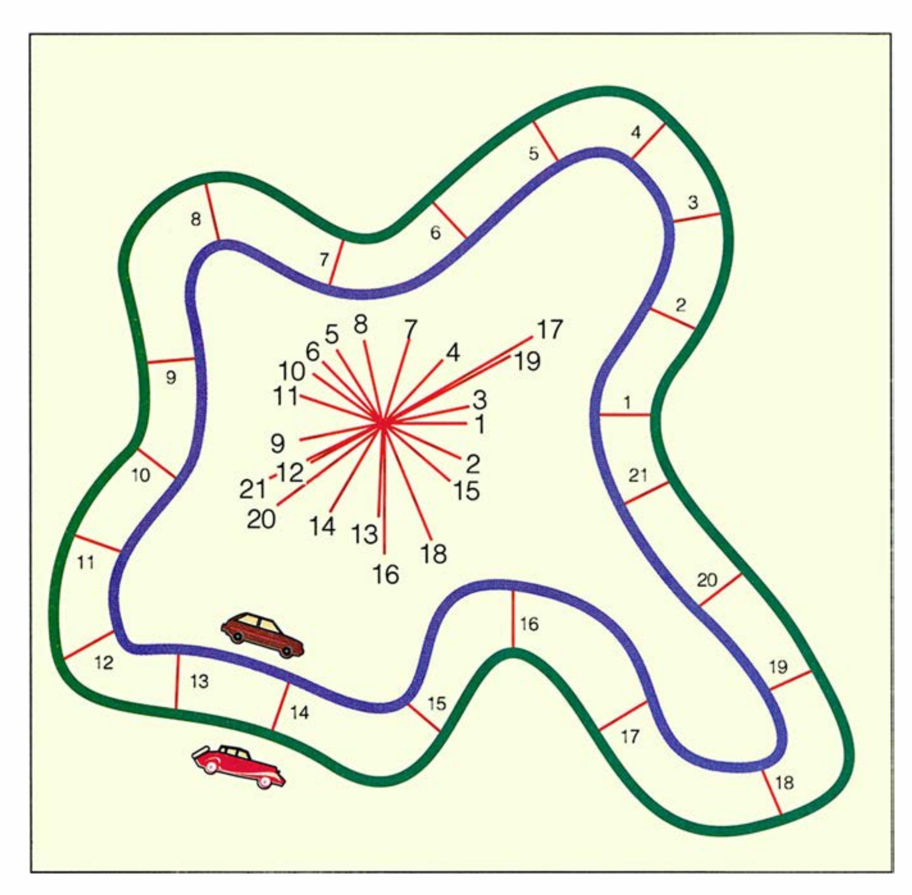
No es difícil organizar lo explicado y construir una demostración rigurosa de que dos circuitos poligonales separados por una distancia r tienen longitudes que se diferencian en $2\pi r$. Imaginemos un coche A que recorre la vía exterior y otro C que lo hace por la interior, manteniéndose siempre a 10 metros de A sobre la perpendicular común a las dos vías. Transportemos la figura sobre una circunferencia de diez metros de radio desplazando paralelamente a sí mismos los segmentos de diez metros (*véase la figura 3b*). La distancia total descrita por C con respecto a A permanece invariable en este desplazamiento; es, pues, igual a la descrita por C sobre la circunferencia. Cuando A da una vuelta completa al circuito (*véase la figura 4*) el movimiento exacto total de C consiste en



2. (a) *Distancia adicional en el caso de polígonos no convexos: súmense los arcos rojos y réstense los arcos azules. El resultado* (b) *es una vuelta completa de circunferencia, cuyo radio es la distancia entre las trayectorias.*



3. *Transporte paralelo del movimiento relativo de dos autos que describen curvas paralelas* (a) *a una circunferencia cuyo radio es la distancia entre estas curvas* (b).

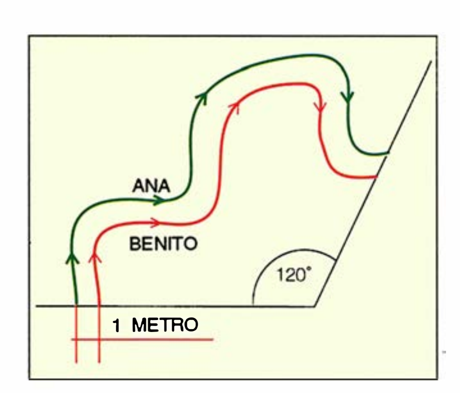


4. El resultado sigue siendo una vuelta completa de circunferencia.

una vuelta a la circunferencia de diez metros de radio. Nos encontramos otra vez con un exceso de $2\pi \times 10$ metros.

¡Pero la *M25* no es un polígono! No importa: toda curva cerrada, por complicada que sea, se puede aproximar tanto como se quiera por una poligonal, de suerte que pasando al límite (o si el lector lo prefiere, salvo por la constante de Planck), el mismo resultado es aplicable a curvas de forma arbitraria. ¡Por fin disponemos de un razonamiento aplicable a la *M25*!

¿Qué decir de la intuición que nos lleva a pensar que al conducir en sentido de las agujas "va por el exterior" de una enorme curva? Nuestra intuición es mala consejera, pues en tal caso la curva será sumamente suave.



5. Ana le echa una carrera a Benito.

Y al alargar el radio de giro la curvatura disminuye, de suerte que la mayor longitud del trazado queda compensada. Una curva cuyo radio de giro se multiplique por dos será dos veces más larga, pero también dos veces menos curvada, y los efectos sobre las diferencias de longitudes quedan exactamente compensados.

Si el lector ha comprendido todo lo dicho, trate de responder a las siguientes cuestiones:

Problema 1. Una señora gruesa y una señora delgada llevan ambas cinturones ceñidos. Cada una de ellas desea forrar el cinturón por el interior con un centímetro de relleno, lo que obliga a alargar los cinturones. ¿Quién de las dos habrá de alargarlo más?

Problema 2. En la figura 5 vemos un tramo de una pista de carreras. ¿Cuántos metros más largo es el recorrido de Benito que el de Ana?

Problema 3. Los peldaños de una escalera de caracol tienen dos metros de anchura. La escalera consta de 150 peldaños, cada uno de los cuales gira un ángulo de 12 grados. Carlos va subiendo por el lado interior, mientras Diana le acompaña por el exterior. ¿Qué distancia adicional recorrerá la joven?

Problema 4. La villa de Gotham tiene una autopista de circunvalación, cuyas vías de sentido horario y antihorario están separadas diez metros, como en el caso de la *M25* ya estudiado. Batman conduce su batmóvil en sentido contrario al de las agujas del reloj y describe una vuelta completa, mientras que Cat Woman conduce un Jaguar en sentido contrario, dando también una vuelta completa al circuito. Sus odómetros registran lecturas exactas. Cuando uno y otra comparan las distancias recorridas, resulta que Batman ha rodado unos 125 metros más que Woman. ¿Cómo se explica?

Problema 5. ¿Qué podemos decir de las áreas de superficies paralelas? El incremento de área de la supeficie externa, ¿es independiente de la forma de las superficies?

Soluciones

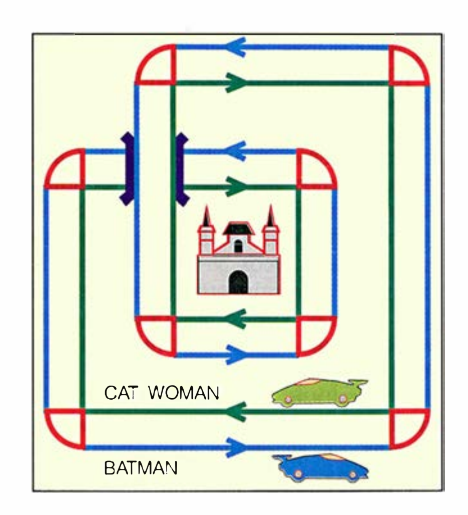
Problema 1. Ambas mujeres habrán de alargar por igual sus cinturones, unos 6 centímetros.

Problema 2. Benito recorre $2\pi/3$ metros más (reagrupemos tres copias del trazado y obtendremos un excedente de $2\pi \times 1 = 2\pi$, por lo que cada copia supondrá un tercio de este valor).

Problema 3. Los desplazamientos verticales de Carlos y Diana son idénticos; bastará, pues, considerar sus recorridos horizontales. Cada escalón gira 12 grados, lo que supone 360/12 = 30 escalones por vuelta. Hay 150/30 = 5 vueltas completas, por lo cual Diana recorre $5 \times 2\pi \times 2 = 20\pi$ (aproximadamente 62,8) metros más que Carlos.

Problema 4. La circunvalación de Gotham se corta a sí misma una vez, como se indica en la figura 6, por lo que el exceso que Batman recorre equivale a dos vueltas de una circunferencia de radio diez metros, o sea $2 \times 2\pi \times 10$, que son aproximadamente 125,7 metros.

Problema 5. Basta considerar esferas y cubos para ver que el área adicional depende de las formas y los tamaños. ¿Por qué razón?



6. La única autopista que circunvala la ciudad de Gotham se corta a sí misma.

Libros

Laureano Carbonell, Luis Alonso y Antonio F. Rañada

Cuarto Centenario

Sanidad militar

La sanidad en la jornada de Inglaterra (1587-1588), por. M. Gracia Rivas; Editorial Naval, Madrid, 1990.

Fernando Nárdiz Vial, almirante, presenta en el prólogo la serie de monografías "Gran Armada", entre las cuales figura la obra que nos ocupa, como resultado de los trabajos de investigación impulsados por el Instituto de Historia y Cultura Naval para conmemorar el Cuarto Centenario de la Empresa de Inglaterra y divulgar nuevos aspectos de aquella operación. El autor parte de la existencia del proyecto de D. Alvaro de Bazán de dotar a la Armada de un hospital de campaña para la atención de los heridos, que sería conocido como "Hospital Real del Exército y Armada de S.M.". Creación de origen típicamente española, cuyos antecedentes se encuentran en el utilizado en ocasión del sitio de Toro en 1476 y que luego experimentaría un gran auge cuando la guerra de Granada. La misión de tales hospitales no se limitaba a la atención de los heridos en campaña, sino que incluía la prevención y tratamiento de las epidemias que frecuentemente afectaban a la tropa cuando permanecía concentrada durante algún tiempo.

El capítulo primero está dedicado al estudio del esquema sanitario de las unidades del Ejército y su equivalente en las de la Armada. En este último caso, cada unidad a flote disponía de un barbero, con escasos conocimientos teóricos, pero muy experto en vendar e inmovilizar heridas y fracturas, así como en sangrar a los enfermos, que juntamente con la administración de purgas y una dieta alimenticia a propósito constituían la base de la mayoría de tratamientos aplicados en la época. Luego, a nivel ya de escuadra, el servicio se completaba, en el caso de tratarse de galeras, con médico, cirujano y boticario, cuyo número variaba de acuerdo con cada caso. En las flotas de naves de alto bordo el personal sanitario no era fijo, sino que variaba en razón de las circunstancias. Si en la flota iba tropa, el cuadro sanitario comprendía un médico, un cirujano y un boticario, como mínimo. En el caso de la Gran Armada, el hospital estaba instalado inicialmente en las urcas *Casa de Paz Grande*, que no llegó a intervenir en la expedición, y *San Pedro el Mayor*, además de contar con una provisión de tiendas de campaña para montar en tierra. Se aportan la tabla de salarios del personal sanitario y la relación de medicamentos de las boticas.

La organización de la asistencia sanitaria en la Gran Armada constituye el núcleo del capítulo segundo. El hospital estaba proyectado para 2000 camas. El capítulo tercero se centra en la situación sanitaria de la Gran Armada en Lisboa, las epidemias que costaron la vida de 128 marinos, entre ellos Alvaro de Bazán. Se acostumbraba combatir esos azotes evitando el hacinamiento de la gente; tras desembarcar la tripulación, "... las naos se podrán limpiar y purgar del aire malo ...". La limpieza consistía en el barrido a fondo de los sollados, mientras que la purga se realizaba mediante la quema de romero para purificar el ambiente. Abunda el capítulo cuarto en la permanencia obligada en Lisboa, con la creación de un nuevo hospital, en las medicinas prescritas y en la dieta de los afectados. De la dotación del hospital de la Gran Armada a la salida de Lisboa, compuesta por 80 personas, se habla en el capítulo siguiente. Y en ese mismo nivel se mueven el sexto (boticarios y preparación de simples) y el séptimo (religiosos: nombre y orden en la que había profesado). Tampoco le fue cómodo a la flota el viaje desde Lisboa a La Coruña, donde hubo de atracar por culpa del mal tiempo y la descomposición de los alimentos. Los 200 hombres que llegaron enfermos a la ciudad gallega pasaron pronto a 500, a los que habría que sumar otros 2000 "malsanos", afectados de "calenturas".

No le fue mejor en el campo de marte. Cayeron 1000 muertos, 1500 heridos y 1500 desaparecidos, en los combates ocurridos entre el 31 de julio y el 8 de agosto de 1588. El regreso fue penosísimo; obligó, desde el 9 de agosto, a reducir la ración diaria. Su insuficiencia, unida a la escasez de agua, contribuyó a que se produjeran numerosos casos de enfermedad. Marinería enferma, hambrienta y sedienta; y casi desnuda, con ropa poco adecuada para las bajas temperaturas y pluviosidad propias de la latitud del norte de Escocia. Esto produjo que el 21 de agosto el duque de Medina Sidonia contara "... más de 3000 enfermos, sin los heridos ...". A estas penalidades añade el autor alguna breve referencia a las vicisitudes de los 6500 tripulantes de las 26 naves que naufragaron en Irlanda.

El estado de la flota a la llegada a Santander, objeto del capítulo décimo, se pone de manifiesto con el recuento de alimentos que quedaban a bordo y la dotación: se habían producido 12.297 bajas y quedaban 13.399 supervivientes. Inmediatamente y a instancias del rey se formaron hospitales para atender a los enfermos y heridos, con el personal sanitario y los socorros facilitados por religiosos de Burgos, Pamplona, Valladolid, Logroño y Santo Domingo de la Calzada. Atención sanitaria en la que se explaya en el capítulo undécimo, recogiendo también las quejas de los lugareños temerosos de que la presencia de las tropas incrementaran las enfermedades y la mortandad de los paisanos.

El capítulo doce trata de las consecuencias humanas de la expedición, analizando los fallecidos, su procedencia, las causas de la muerte, en qué nave iban, las características de las familias, así como las vicisitudes corridas por los prisioneros que quedaron en Inglaterra e Irlanda, hasta ser rescatados y cuyo mayor contingente lo formaban los 800 hombres llegados a La Coruña en la flota de tres filibotes y una urca de Pedro de Zubiaur el 10 de febrero de 1590.

En el epílogo evalúa las consecuencias del fracaso de la empresa de Inglaterra, llegando a la conclusión de que, a pesar de las pérdidas sufridas, España pudo seguir manteniendo la hegemonía durante bastante tiempo, pues el equilibrio de fuerzas no experimentó ningún cambio sustancial. Le siguen tres anexos documentales, dedicados a las medicinas embarcadas, los asientos del hospital del contador Alameda y la relación de la gente de mar guipuzcoana fallecida en Inglaterra, para terminar con un oportuno índice onomástico.

La obra en su conjunto constituye una extraordinaria aportación al conocimiento de la organización de la sanidad militar del siglo XVI. Su autor es comandante médico de la Armada en activo. (L. C.)

Biología teórica

Clasificación por genes

The comparative method in evolutionary biology, por Paul H. Harvey y Mark D. Pagel. Oxford University Press; Oxford, 1991. **Phylogeny and classification of birds. A study in molecular evolution**, por Charles G. Sibley y Jon E. Ahlquist. Yale University Press; New Haven, 1990.

De escasa eficacia demostrativa en física, el método comparativo adquiere una fuerza particular en biología. El primer libro es una reflexión sobre su valor para el desarrollo de la biología teórica; el segundo, una aplicación privilegiada, única, del mismo.

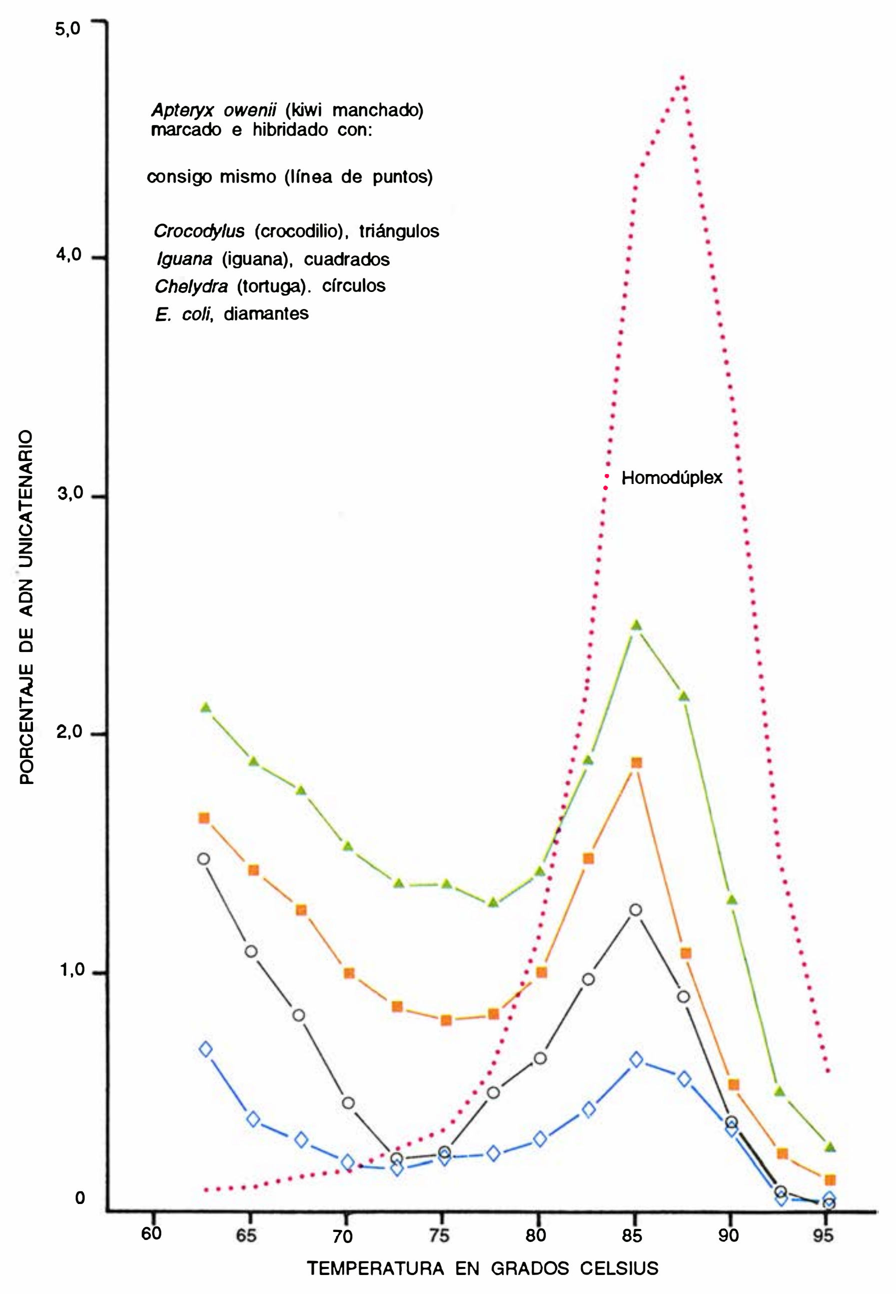
Larga es la historia del uso de la comparación en biología. Fijistas y evolucionistas se han servido de su poder para tejer sus propias tesis. Método favorito de Cuvier, pero también de Darwin. El hilo de esa atracción nos lleva a una comprobación diaria de los naturalistas: resulta casi imposible imaginar cómo proceder mejor que como se desenvuelve cualquier organismo en su medio, y éste condiciona tanto que fácilmente apreciamos caracteres convergentes en las especies que lo frecuentan, por alejadas genéticamente que se hallen unas de otras. La comparación nos remite así a un contexto evolutivo; en efecto, si organismos distintos desarrollan caracteres similares para acometer funciones parecidas, significa que, a lo largo de la evolución, se repiten determinados patrones.

De un tiempo a esta parte se ha avanzado bastante en el estudio de la comparación, en particular con los trabajos de Joe Felsenstein, suyos o inspirados en su obra. Por lo que hace referencia a la relación del método con la teoría de la evolución, ésta se apoya en aquél para buscar vías posibles de bifurcaciones a tenor de la composición actual de las poblaciones. Dicho de otro modo, los métodos comparativos actuales se apoyan en la genética y en la estadística para medir la cercanía o distancia entre dos especies o más y la cercanía o distancia del tronco de partida. (Suele hablarse de tres fuentes de semejanza estructural y funcional en los organismos: la convergencia, el paralelismo y el antepasado común. La evolución convergente y la paralela producen semejanzas análogas; el antepasado común, homólogas.)

Para llegar al estado actual de la ciencia se ha tenido que tender un puente entre las dos corrientes principales que recurrían a la homología y la analogía: la sistemática taxonómica y la ecología. Se esforzaba la primera en plasmar la clasificación y evolución de los organismos a través de árboles filogenéticos. Contraponíase a ese enfoque diacrónico de los sistemáticos la visión gremialista, sincrónica, de los ecólogos, que insistían en el estudio de la adaptación de los individuos y estabilidad de los sistemas, o en su diversidad. Por la comparación llegamos al conocimiento de la diversidad, y entender cabalmente ésta nos exige descubrir por qué razones se halla en un momento de estasis en su historia evolutiva.

El método comparativo debe recorrer varios pasos. Ha de comenzar por abordar el problema central, el de la similaridad, mediante los recursos estadísticos creados para ello. El grado de afinidad, o de parentesco, nos permite elaborar los árboles filogenéticos, con el uso ideal de datos moleculares de ADN. (La obra de Sibley y Ahlquist constituye, por su aportación a este terreno, un hito en la historia de la biología contemporánea.)

Debiera decirnos también el método



Híbridos ADN-ADN de ave y reptil. Un híbrido homodúplex es la molécula dúplice de ADN-ADN formada por ADN marcado y sin marcar del mismo individuo; un híbrido heterodúplex es una molécula dúplice de ADN-ADN compuesta de una cadena de de ADN radiactivamente marcado de una especie y una cadena de ADN sin marcar de una especie distinta. Cada curva heterodúplex representa el promedio de cinco híbridos. El máximo cerca de los 85 grados C se debe a la hibridación trazador-trazador; por consiguiente, sólo el segmento de baja temperatura de las curvas refleja la formación heterodúplex. Adviértase cómo cae la cuantía de formación heterodúplex con los reptiles que se alejan más de las aves.

comparativo si ciertos caracteres discretos que observamos se prestan, o se han prestado, a una evolución encabalgada. Pensemos, por ejemplo, en las orugas, que han pasado de una coloración críptica a una coloración advertidora o aposemática y, en algún caso, se han convertido en desagradables para el paladar: ¿han evolucionado de forma independiente ambos rasgos, la coloración aposemática y el sabor desagradable? Tras el estudio de los caracteres discretos, forzoso es trazar el análisis comparativo de los caracteres de variación continua. Es la parte más personal de la obra de Harvey y Pagel: examinan los métodos vigentes (direccionales y no direccionales) y justifican la creación de las variantes propias.

Tiene el libro de Sibley y Ahlquist la frescura de las grandes creaciones. Su claridad. "La filogenia viene a ser como un árbol enmarañado, de breve tronco y ramificaciones de infinitos órdenes hasta acabar en tenues brotes terminales. La altura del árbol cuenta el tiempo. La copa no es regular: cada rama posee su propio reloj evolutivo, acompasado éste a la longitud de aquélla. Los nudos señalan el episodio de divergencia de una especie que se parte en dos. El derroche horizontal de ramas simboliza la diversidad de organismos, viviendo hoy los que asoman en los brotes últimos. Las ramas de órdenes inferiores a esos rebrotes eran seres que desaparecieron, los antepasados, cuyos restos fosilizados es lo único que nos queda, si nos queda. La mayoría de las ramas se han desgajado mucho antes; correspondieron a los linajes extinguidos."

De lo que se trata, pues, es de reconstruir el árbol con la mayor exactitud de fechas de ramificación posible, para así rehacer la historia de la vida, la filogenia, en la Tierra; en particular, la evolución de las aves desde el primer antepasado que incoó el linaje aviar separándose del reptiliano en el período Jurásico, hace unos 150 millones de años.

¿Cómo? Hasta el giro de Sibley, el método empleado era el de la comparación morfológica, que permite juntar o separar organismos de acuerdo con su estructura. Pero es un método de posibilidades limitadas y muchas veces infectado por una sutil convergencia. Tampoco es legítimo depositar toda la esperanza en el registro fósil, porque éste sólo ha podido obrar en determinadas circunstancias, que no coincidieron en la extinción de muchas especies. Unicamente el método capaz de medir las distancias genéticas y genealógicas puede lograr resultados sólidos en la reconstrucción de la filogenia. Es el método de la hibridación ADN-ADN. Ese fue el giro de Sibley y, ésta, su obra canónica.

La hibridación ADN-ADN mide los grados de parentesco genético entre especies mediante la comparación de su contenido de ADN. El grado de lejanía responde al tiempo en que divergieron a partir de un antepasado común. El examen morfológico subsiguiente entre especies vivas corrobora el acierto del método molecular, así como el registro fósil, cuando existe, respalda la filogénesis inferida. (El lector encontrará los pormenores del método de la hibridación en el artículo de Sibley y Ahlquist "Filogenia de las aves mediante comparación de ADN", publicado en *Investigación y Ciencia*, abril de 1986.)

Recuerda Sibley que, pasada ya la segunda mitad de nuestro siglo, la taxonomía de las aves había llegado a tal punto muerto que no cabía esperar grandes innovaciones. El método morfológico se había agotado. Pero los avances en bioquímica de proteínas le sugirieron la aplicación del análisis de las secuencias de aminoácidos a la sistemática. No progresó mucho. Pero sí la bioquímica, ahora del ADN, con el descubrimiento y el desarrollo de la hibridación. Se hicieron los primeros tanteos con virus, luego con eucariotas; por fin, con organismos superiores. En 1975 empezó él con su equipo un trabajo que duraría once años y medio sin interrupción, durante el cual produjeron 30.054 híbridos, de los que 26.554 pertenecían a aves, 3150 a mamíferos y 350 a otros vertebrados. Material más que suficiente para crear *ab ovo* una nueva filogenia.

La obra es eminentemente didáctica. Sin perder nunca de vista el taxón que lo motiva, arranca con una exposición detallada de genética molecular, sigue con los métodos y materiales necesarios para acometer la hibridación (un cuaderno ejemplar de laboratorio: reactivos, centrífugas, trazadores, marcador radiactivo, esto es, I^{125}), análisis de los datos. Aborda de plano el problema, apuntado una y otra vez, del ritmo de la evolución, es decir, el de la periodicidad de las mutaciones en las aves y su relación con la edad de reproducción. Para llegar con fuerza a la clasificación real, en síntesis (dendriforme) y razonada, orden por orden, familia por familia. (L. A.)

Prístina medicina

Hipócrates-Herófilo-Galeno

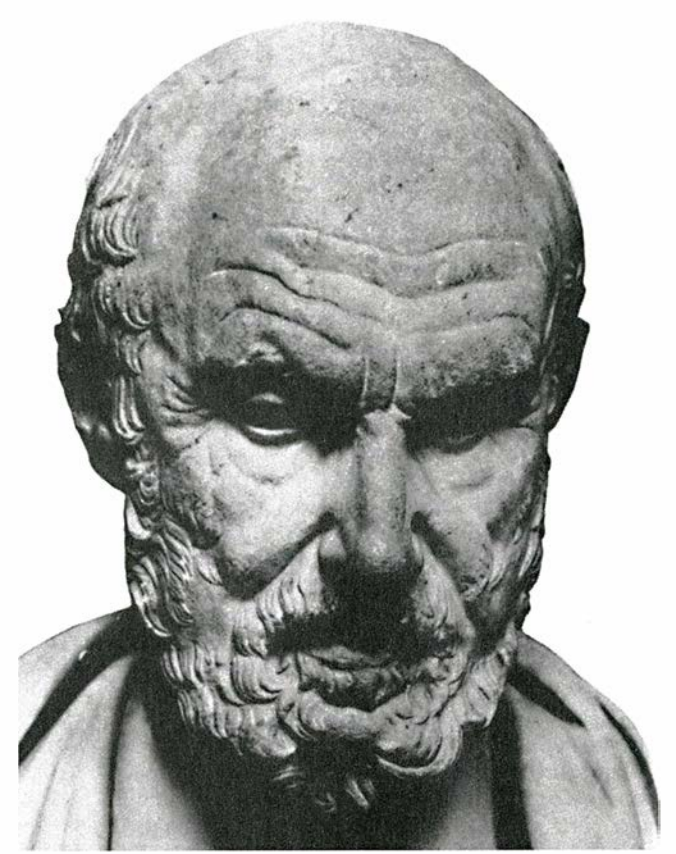
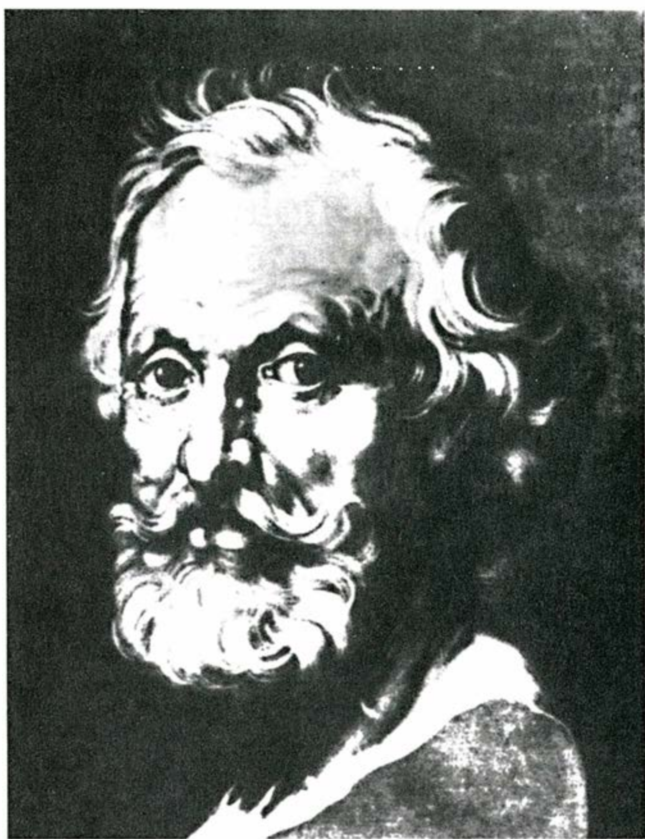
DIE HIPPOKRATISCHEN EPIDEMIEN. THEORIE-PRAXIS-TRADITION. Dirigido por Gerhard Baader y Rolf Winau. Franz Steiner Verlag; Stuttgart 1989. **LA MALADIE ET LES MALADIES DANS LA COLLECTION HIPPOCRATIQUE.** Dirigido por Paul Potter, Gilles Maloney, Jacques Desautels. Editions du Sphinx; Québec, 1990. **HEROPHILUS. THE ART OF MEDICINE IN EARLY ALEXANDRIA.** Edición, traducción y ensayos de Heinrich von Staden. Cambridge University Press. Cambridge, 1989. **GALEN'S METHOD OF HEALING.** Dirigido por Fridolf Kudlien y Richard J. Durling. E. J. Brill; Leiden, 1991.

La medicina antigua, para nuestro universitario medio (físico, biólogo, arquitecto, ingeniero o experto en tectónica de placas), es Hipócrates, borrosamente asociado a Galeno. No ahonda demasiado en distinciones entre uno y otro el médico, si no echa mano del *Laín*, y a este manual de historia de la medicina tendrá que recurrir si quiere recordar la doctrina, y el nombre, ya olvidados de Herófilo de Alejandría.

Mas, desde el siglo II hasta el Renacimiento, la medicina fue Galeno, anatematizado desde finales del XV por haber mancillado la fuente de la medicina prístina, Hipócrates. Para recuperar a Herófilo hubo que esperar varias centurias todavía; para redimir al de Pérgamo, también. Y aunque no podemos afirmar que ya esté todo escrito sobre esa tríada máxima de la ciencia occidental, sí dispone el lector de la documentación necesaria para hacerse una idea sólida. Puestos a escoger lo más granado de la bibliografía reciente, no parece arriesgado apostar por los cuatro de cabecera.

Transcurrió la vida de Hipócrates de Cos entre el 460 y el 370 antes de Cristo, un tiempo de asentamiento de la aproximación racional al estudio del hombre y del mundo, que, si bien mantenía el ropaje verbal de la epopeya homérica, vaciaba de contenido su significado mitológico. Suele destacarse, al explicar ese contexto cultural, la atribución a la naturaleza, a la *physis*, los fenómenos antaño derivados del *caos*. El conocimiento de una y otros, expresado en un *logos*, pasa de los poetas inspirados a los debeladores de sus causas, los fisiólogos (en el sentido de entendidos en la *physis*). La mayoría de éstos escribirán, como dice Clemente que ya hiciera antes que nadie el propio Alcmeón, *physikon logon*, una obra sobre la naturaleza.

La geografía de ese saber se extiende desde el sur de Italia hasta las costas orientales del Egeo, en particular, desde Crotona (Alcmeón) hasta Cos (Hipócrates) y Cnido (Ctesias). Por encima de todos sobresalió Hipócrates, quien, como ocurrió con otros científicos y filósofos, hallaría en Alejandría, siglos después, su sanción universal con la compilación de sus obras, el *Corpus Hippocraticum*. Cierto es que no existe constancia de que él escri-

Tres hitos jalonan la medicina antigua: Hipócrates, su fundador (izquierda), Herófilo, quizás el más experto en la técnica del arte, y Galeno, el de más pulso sistematizador con la introducción de un método riguroso (derecha).

biera, de su puño y letra, ni uno de esa colección de más de cincuenta tratados, redactados en su mayoría en las últimas décadas del siglo V y primeras del IV antes de Cristo y que suelen adscribirse unos a la escuela de Cos y otros a la de Cnido. Representativos de la escuela de Cos son los siete libros de las *Epidemias*; *Sobre las enfermedades* resume bien el pensamiento médico de Cnido. En eso se apoya, en parte, nuestro criterio seleccionador.

Die hippokratischen Epidemien recoge las ponencias (en francés, inglés o alemán) del V Coloquio Internacional Hipocrático que, bajo los auspicios de la Sociedad Berlinesa de Historia de la Medicina y el Instituto de Historia de la Medicina de la Universidad Libre de Berlín, se celebró en la vieja capital prusiana en 1984. Estas reuniones, de periodicidad trianual e iniciadas en Estrasburgo en 1972, nacieron con el propósito de dar cauce al resurgimiento de los estudios hipocráticos que, desde distintos flancos (filológicos y médicos), venía produciéndose en diferentes centros.

La importancia nuclear de las *Epidemias* en la Colección hipocrática fue estudiada con minuciosidad por K. Deichgräber en 1933. Lo que vino después de su libro (*Die Epidemien und das Corpus Hippocraticum*, reimpreso en 1971) puede considerarse o glosa o crítica, de manera especial por la tradición filológica de Pohlenz y Nestlé en los años treinta, o la contemporánea de Robert, Benedetto, Jouanna y Alsina. La opinión de Deichgräber constituye punto de referencia constante en el congreso de Berlín.

La epidemia hipocrática no debe asociarse a la entidad nosológica que hoy caracterizamos por un agente causal, vírico o bacteriano, responsable de la aparición y propagación del mal (sida o cólera). La noción de contagio, desconocida entre los médicos de la antigüedad, no se introduce con rigor hasta el XVI. Las "epidemias" hipocráticas designaban el conjunto de afecciones observables durante un período determinado en un determinado lugar; tenían que ver, pues, con las estaciones, los aires y las aguas. ¿Significaba ello que carecían de factores etiológicos identificables? Pérez Félez, Bratescu y Comiti abordan directamente la cuestión; de su complementaria resolución podemos inferir la existencia de yuxtaposiciones o asociaciones concomitantes de fenómenos externos y síntomas internos, causas generales y causas particulares. La razón de fondo, sin embargo, estriba en el concepto disputado de *prophasis*: hasta qué punto podemos traducirlo por "causa".

La aclaración de la terminología —sufijos, formas verbales, adverbios, vocablos más usados, sinónimos y coherencia de significado— es medio para descubrir la antigüedad, la relación entre tratados y entre partes de una misma obra, así como la autoría, una o plural, de cada escrito. En ese campo labora aquí Jouanna ("Lugar de las *Epidemias* en la Colección hipocrática: el criterio de la terminología"), Ioannidi ("La práctica de la escritura en los médicos autores de las *Epidemias*"), Zaragoza y González ("Reflexiones sobre el léxico en las *Epidemias II, IV, V, VI* y *VII*").

El léxico, en definitiva, encierra la clave que abre las demás puertas: las de la estructura formal (artículos de Banu sobre la relación ciencia-filosofía en las *Epidemias*, de Ingenkamp sobre el carácter axiomático, de Smith sobre la forma genérica, de Langholf sobre generalizaciones y aforismos en las *Epidemias*, y de Roselli abundando en la historia de esto último); las puertas que nos introducen en algunas enfermedades (perinatales y ginecológicas, por Hanson), en la dieta (Kollesch), en la materia médica (Maloney) y en condicionantes (meteorológicos, mágicos). Gracias a un fino análisis terminológi-

co, Robert descubre una suerte de juicio de doctores en el libro V.

Suelen rematar estas convenciones en la prolongación histórica del tema estudiado, ya sea la influencia inmediata (Alsina sobre Tucídides, Bertier sobre el Corpus aristotélico), mediata (Lanata sobre el hipocratismo tardío, Kudlien sobre su recepción en el helenismo) o remota (Weisser sobre la medicina árabe, Baader en el Medievo, Nutton sobre el Renacimiento y Leitner y Rudolf sobre el siglo XVIII). No es exigua la aportación filológica española a este volumen; pero se echa en falta alguna contribución "médica", pues, si bien se hace eco de *La medicina hipocrática* de Pedro Laín, algo más podría decirse desde el alcalaíno Cristóbal de Vega hasta Andrés Piquer.

Lo que Deichgräber es para las *Epidemias* y Cos, lo es Jouanna para las *Enfermedades* y Cnido con su edición crítica de *Maladies II* (1983), continuación de *Hippocrate. Pour une archéologie de l'école de Cnide* (1974). A la nosología hipocrática se dedicó el Sexto Coloquio Internacional Hipocrático, celebrado en Québec en 1987, cuyas actas componen *La maladie et les maladies dans la Collection Hippocratique*.

Con todas las cautelas que precisan las generalizaciones, parece cierta la aseveración de que los escritos cnidios prestan más atención a las enfermedades y los de Cos al paciente. Pero es obvio que todo el Corpus hipocrático es un tratado de la enfermedad, de su diagnosis y prognosis; por eso, la mayoría de las intervenciones saltan con libertad de *La enfermedad sagrada* a las *Epidemias*, de éstas a las *Enfermedades*, a las *Afecciones internas*, a los *Aforismos*, a la *Medicina antigua*, es decir, de un tratado seguro de Cos a otro de fuente cnidia o de origen indeterminado.

El médico hipocrático conoce unas doscientas enfermedades. Comienza por aislar y ordenar los fenómenos que van unidos a una enfermedad, define luego las notas características de ésta y, en tercer lugar, le pone nombre. Si procede, describe las posibles formas en que se manifiesta. Las presenta, en la mayoría de los casos, ordenadas en una sucesión anatómica, *a capite ad calcem*, pero no rehúye agruparlas por su lugar específico: oídos y boca, riñones, hígado, bazo.

Taxativamente se proclama, en los dos primeros capítulos de la *Enfermedad sagrada*, que ni es sagrada ni provocada por los dioses, sino que sus causas son del mismo rango natural que las que explican las demás. Unas exógenas (meteorológicas), otras endógenas (humorales). Ahondan en la etiología Brastescu, Licciardi, Langholf, Byl (en colaboración con De Ranter) y Thivel. Ello no impide, sin embargo, que la secularización conceptual (Pigeaud y Ducatillon) llegue envuelta todavía en el lenguaje arcaico de la mitología y se describa con analogías y metáforas de miedos ancestrales y agresiones felinas (Jouanna).

Tarea difícil, pero ineludible, para el historiador es la de acotar la enfermedad exacta de que está hablando el texto. Sea una de las más citadas, la pleuritis. Con ese mismo nombre, y según la ocasión, se nos describen hasta tres constelaciones de enfermedades: las que afectan a la cavidad torácica, las que implican ésta y los riñones y las que involucran la membrana pleural y las vísceras, por no mencionar el universo de microorganismos presumiblemente responsables. Hipótesis ésta que nos lleva a un cuadro todavía más enrevesado, el obscuro *causos*, hoy desconocida según unos y "entidad clínica definida por un núcleo de síntomas cardinales y una nube periférica de síntomas incoherentes", según Grmek.

Entre otras líneas abiertas en el congreso de Québec, vale la pena destacar la presentación del proyecto Anacos ("Analyse de Correspondences en Operating System"), en cuanto significa la aplicación de la informática a los estudios clásicos: palabras clave (enfermedad, enfermar), su frecuencia, términos que le acompañan, tratado en que aparece, etcétera.

Tras Hipócrates, la medicina clásica se llama Herófilo de Calcedonia. Con el vigor que aportan los emigrados, *floruit* en la Alejandría rival de Atenas, dotada ya del Museo y la Biblioteca, a principios del siglo III antes de Cristo; la luz de su influencia perduró hasta el siglo tercero de nuestra era. Su obra dispersa se nos ofrece ahora en magnífica edición crítica por Heinrich von Staden, gracias a la cual el lector culto puede adentrarse en una figura señera del helenismo pefectamente delimitada, sin tener que recurrir a juicios parciales, de refilón, ni a caracterizaciones generales extraídas de sumarios. Se ha guiado en su tarea por el lema *non multa sed multum*, es decir, no abarcarlo todo (obras seguras, obras dudosas, obras atribuidas) sino profundizar en el pensamiento inequívocamente suyo y hacerlo de forma organizada en dos partes; la primera, y más extensa, dedicada a Herófilo: vida, escritos, las partes de la medicina, teoría del método y de las causas, anatomía, fisiología y patología, régimen y terapéutica, juicios sobre Hipócrates; la segunda parte está consagrada a los herofíleos: Andreas, Calianax, Calímaco, Baquio, Zenón, Demetrio de Apamea, Hegetor, Mantias, Dioscórides Facas, Crisermo, Zeuxis, Alejandro Filaletes, Apolonio, Heráclides, Aristoxeno, Cidias, Gayo y Demóstenes Filaletes. Desarrolla cada capítulo en una introducción general, exposición de los textos griegos y su traducción y, si procede, un minucioso comentario de los puntos conflictivos.

Mientras no llegue el trabajo esperado de Marshall Clagett sobre medicina egipcia, el examen de las influencias de los sanadores nilotas sobre los griegos deberá partir del aquí brevemente razonado por Staden, partidario de una segregación de comunidades (la inmigrante y la indígena) e ideas, atemperada por la usurpación del método cuantitativo y la constante aplicación de remedios egipcios. La colonia griega, por lo demás, estaba dividida en diversas escuelas (empíricos, metodistas, pneumáticos, dogmáticos, racionalistas), de las que suelen hacerse eco las historias de la medicina al uso, siguiendo, por lo común, el juicio diacrítico de Galeno.

El arte de la medicina, admite Herófilo, estriba en el conocimiento de las cosas que miran a la salud, el conocimiento de las cosas referidas a la enfermedad y el conocimiento de las cosas neutras. Esa voluntad clasificadora arranca de Platón y Aristóteles y se hace tripartita en la escuela estoica. De Aristóteles nace también el principio metodológico de acuerdo con el cual "primero hay que observar los fenómenos y buscar luego las causas", seguido por Herófilo en lo concerniente a los fenómenos pero con cierta frialdad en la pretensión de identificar las causas. La observación alcanza en el calcedonio su cenit con la disección de cadáveres, práctica que retrocederá con Galeno, quien elabora su teoría anatómica fiado en simios. (Herófilo, sin embargo, fue demasiado lejos cuando no se detuvo ante la vivisección de condenados a muerte, y no parecen afortunados los argumentos exculpatorios de Staden.)

Constituye la anatomía, efectivamente, su dominio maestro. Gabriello Fallopia lo destacaba ya en 1561: "Cuando Galeno refuta a Herófilo, refuta el mismo evangelio de la medicina, porque la autoridad de Herófilo es, para mí, puro evangelio en asuntos anatómicos." Vio más que nadie en el cerebro, los ojos, los nervios, el sistema vascular, sistema digestivo y aparatos de la reproducción del varón y de la mujer; singularizando lo que distinguió: membranas meníngeas, plexos coroideos, *torcular Herophili* ("prensa de Herófilo"), nervios, membranas oculares (esclero-córnea, iris, retina y coroides), proceso estiloideo, duodeno (corrupción latina del nombre que él le puso, *dodekadaktylon*, "de doce dedos

de largo"), epidídimo, vasos quilíferos y varios más relativos al aparato reproductor femenino y al sistema vascular.

No fue menor su aportación a la fisiología, que él entendía como prolongación natural de la constitución anatómica y que se compendia en la función que le asigna al pulso arterial, auténtica herramienta revolucionaria del diagnóstico. Para su medición creó una clepsidra portátil o reloj de agua: la frecuencia del pulso, que sabía variable con la edad, respondía a la temperatura del cuerpo, esto es, a pulso acelerado temperatura más alta. Atendiendo a la morfología del aparato genital, explicó la espermatogénesis y embriogénesis; considerando pulmones y corazón, movimientos respiratorios y musculares. La fisiología le conduce a la patología, a un elenco pormenorizado de causas y síntomas, y de sus remedios terapéuticos. No dudó en discrepar de Hipócrates, ni jamás buscó su sanción; pero no fue el opositor negligente que nos pintó Galeno, idea que en parte ha perdurado hasta la aparición de este volumen de von Staden.

Galen's Method of Healing abre el fuego de una nueva colección de estudios sobre medicina antigua, dirigida por John Scarborough, experto en terapéutica romana y farmacología clásica. No ha podido incoarse con mejor pie: un simposio sobre el escrito clínico más importante del médico occidental, durante siglos. Desde 1982, año de la celebración del simposio, hasta 1991, fecha de publicación de las ponencias, no se ha producido ninguna contribución sobresaliente al *Methodus Medendi* de Galeno, por lo que el lector tiene lo que hoy sabemos de su principal texto clínico.

Mas, por importante que sea para el historiador de la medicina y la biología, *Methodus Medendi* interesa al cultivador de la filosofía. Viene a ser, en efecto, un *Discurso del método* "avant la lettre", a propósito del camino correcto que debe andar el intelecto para llegar a la idea clara de la enfermedad (diagnóstico), de su evolución (pronóstico) y del remedio que conviene indicarle (terapéutica). Las contribuciones de Galeno a la lógica están recogidas en las síntesis generales (véanse, en castellano, la de Prior o la de Valverde).

Vivian Nutton analiza aquí el estilo y el contexto del *Methodus Medendi*, obra que, en la edición canónica de Kühn, abarca 1021 páginas y constituye la exposición más acabada sobre la teoría y la praxis médica del pergameo. Obra que escribió en dos etapas (la primera, los libros 1-6; la segunda, los libros 7-14) con un hiato de 20 años. Nutton reconstruye la vida de Galeno al hilo de la redacción de un bloque (hacia el año 174) y el otro (en la segunda mitad del decenio de los noventa), sus escritos contemporáneos y el cambio social que experimenta en la Roma de las postrimerías del siglo II de nuestra era, de advenedizo a médico afamado. Se adentra en las características de cada libro y en la transformación del enfoque que la obra va sufriendo. Y con el análisis del contenido, el examen de la forma estilística, inseparable de aquél. Galeno domina el retrato, la metáfora, la ironía, el lenguaje sentencioso, el sarcasmo, el valor contrastante de las adversativas, la fuerza de las interjecciones, el cambio de registro (del aoristo al presente histórico o al imperfecto).

Recursos literarios puestos al servicio de una lógica rigurosa de inspiración, o convergencia, estoica y aristotélica. De la lógica y terapia de Galeno se ocupa Jonathan Barnes, quien nos había dado ya un adelanto en "Medicine, experience and Logic" (*Science and Speculation*, Cambridge 1982). En su opinión, Galeno compendia el modelo de médico-filósofo que propone en *Methodus Medendi*, aquel que aplica, por deducción, los principios generales a la realización del acto médico. Sus enemigos, los que no pertenecen a la escuela dogmática heredada de Hipócrates, son ilógicos, es decir, irracionales, casuistas. Rechaza la argumentación tautológica, de definición nominalista de los términos, y la sustituye por el contenido que aporta la observación, dejando, además, la puerta abierta a la plausibilidad y el azar. Igual que hizo en el artículo mencionado, Barnes trasvasa a lógica simbólica las reglas de inferencia implícitas en el razonamiento de Galeno.

Galeno introduce la terapia en el método terapéutico a través de la *éndeixis*, la indicación, tema central del *Methodus Medendi*, abordado aquí con pormenor por Fridolf Kudlien, Richard J. Durling y Ian Cassells. Sobre ella abunda también Jerome Bylebil, que estudia la enseñanza del *Methodus Medendi* en el Renacimiento (en particular en la escuela de Padua, en Bautista da Monte). Casi invariablemente traducida por indicación, *éndeixis* se predica de la prescripción médica que cumple todas y cada una de las notas del método: atención al proceso morboso, *physis* de la parte afectada y del enfermo globalmente considerado, circunstancias de edad y sexo, el medio en que vive y los sueños.

Otras conferencias obligadas (fundamentos científicos de la cirugía galénica, recepción del *Methodus Medendi* entre los árabes, manuscritos medievales, etcétera) coronan esta obra, hermana de otra dirigida por Nutton (*Galen: Problems and Prospect*, Londres 1981). Ambas le ofrecen al lector lo que conviene saber sobre el particular. (L. A.)

Mecánica del caos

¿Clásica o cuántica?

CHAOS IN CLASSICAL AND QUANTUM MECHANICS. Martin C. Gutzwiller. Springer-Verlag, New York, 1990.

Las dos mecánicas, la clásica y la cuántica, están en alza. Si a cada una por su lado se le concede un papel creciente en la formación básica de un científico, su relación mutua y el terreno frontera que las separa es hoy un polo activo de trabajo. Es especialmente notable el enorme cambio de imagen que ha sufrido la mecánica clásica, pasando de ser vista como una simple aplicación donde ensayar métodos o como una ciencia casi de museo, necesaria para los astrónomos e ingenieros pero alejada de las preocupaciones de hoy, a ser un punto animado de encuentro. Se le concede más espacio en los planes de estudio, se crean revistas a ella dedicada, se convocan congresos.

Dos son las razones para tal cambio. En primer lugar la comprobación de que los sistemas dinámicos deterministas tienen comportamientos mucho más complejos que lo que se suponía y se afirmaba hasta ahora. Se trata de lo que se llama *caos* o *movimiento caótico*, cuyo descubrimiento está modificando profundamente muchas ideas establecidas, empezando por la misma ley de la naturaleza. Esto incluye a los que siguen tanto las leyes de Newton como otras ecuaciones diferenciales, no sólo en la física o en la química, sino incluso en ciencias aparentemente tan distintas como la ecología o la economía. Paradójicamente, en medio de la complejidad emergen pautas universales que permiten tratamientos unificados de áreas muy lejanas, tal como la dinámica celeste, la convección de fluidos, los electrones en campos de microondas o la dinámica de las poblaciones. El resultado es una nueva disciplina, la dinámica no lineal que combina la antigua mecánica clásica con un punto de vista mucho más integrador y general.

En segundo lugar, muchos aspectos básicos de los sistemas cuánticos no pueden ser bien entendidos sin una consideración de la correspondiente dinámica clásica, como ocurre ya en el simple caso del espectro de un átomo de hidrógeno en un campo magnético. Estas observaciones están forzando a corregir una situación patológica en la que ideas tales como la relación entre simetrías y leyes de conservación, los métodos aproximados o el papel de la teoría de grupos se aplican por primera vez en cursos de mecánica cuántica, porque no cabe explicarlas en los exiguos cursos de la clásica, donde hu-

biese sido más adecuado. No olvidemos, por recordar un ejemplo histórico, cómo la teoría hamiltoniana fue inspiradora en De Broglie y en Schrödinger y cómo Dirac empezó a construir su mecánica cuántica al comprender que el entonces misterioso producto antisimétrico de Heisenberg se corresponde con el paréntesis de Poisson de las variables clásicas. Asistimos así a la emergencia de un nuevo consenso que afirma la necesidad de insistir en la relación entre las mecánicas clásica y cuántica en la formación de físicos, matemáticos y químicos.

El libro de Gutzwiller se sitúa precisamente en esa tierra de nadie, poco presente en los textos a pesar de su enorme importancia. Su autor llega a ella desde la teoría de sistemas dinámicos, al constatar que muchas de sus ideas son imprescindibles para entender algunas cuestiones cuánticas, y recoge un material muy interesante que hasta ahora sólo se encontraba en artículos de revistas o en libros de alto nivel matemático. Está redactado como una colección de ideas y ejemplos, antes que como una exposición sistemática, pues no busca la generalidad ni se detiene en los detalles de los teoremas matemáticos. Con estilo ágil e informal, insiste en los razonamientos geométricos e intuitivos, más bien que en los analíticos o algebraicos, aunque hay que reconocer que, en un campo tan difícil, hay que tener cuidado pues lo geométrico no respaldado por lo analítico puede deparar sorpresas desagradables. El autor explica que la idea que ha guiado su trabajo a lo largo de muchos años, y también a este libro, es la pregunta *¿Cómo puede entenderse la mecánica clásica de Newton, Euler y Lagrange en cuanto caso límite de la mecánica cuántica de Heisenberg, Schrödinger y Dirac?*, a la que estamos aún lejos de dar una respuesta satisfactoria.

El nivel de esta obra es de doctorado o alto de licenciatura, pues su lectura exige algo más que un curso general de mecánica clásica y cuántica como los que se dan en España en el segundo ciclo, aunque se necesita más el entendimiento intuitivo de los conceptos que los desarrollos analíticos. Empieza con una revisión de las mecánicas de Lagrange y Hamilton, en estilo informal y con ejemplos. Dedica después un capítulo a la idea de sistema integrable y de movimiento multiperiódico ilustrado con ejemplos tales como la molécula ionizada de hidrógeno o la cadena de Toda, pasando luego a una discusión del problema de los tres cuerpos a través del sistema Tierra-Sol-Luna. Plantea aquí una interesante cuestión que me parece está sin resolver. Se sabe, desde los teoremas de Bruns y Poincaré del siglo XIX, que este sistema, sin duda paradigmático, no tiene más constantes del movimiento analíticas en las coordenadas y en los cocientes de las masas que la energía, el momento lineal, el angular y la posición del centro de masas, lo que no basta para reducir el sistema a cuadraturas (es decir, a integrales de funciones conocidas y de sus inversas) y sólo prueba que las trayectorias están contenidas en variedades de seis dimensiones del espacio de las fases. Esto se interpreta normalmente como prueba de que el sistema no es integrable de ningún modo, lo que parece concordar con el caos que puede observarse en algunas soluciones. Sin embargo, los teoremas anteriores no excluyen la existencia de otras constantes no analíticas, pero con un número alto de derivadas acotadas. De hecho, la regularidad que se observa en el sistema Tierra-Sol-Luna sugiere esa posibilidad, a pesar de que faltan pruebas matemáticas a favor o en contra. Esta posibilidad obligaría a replantear muchas de las ideas del folclore del movimiento caótico.

Dedica luego un capítulo a las órbitas periódicas, de las que Poincaré decía a finales del XIX que son *como las ventanas por las que podemos entrar en una fortaleza inexpugnable* y cuya importancia acreció tras la llegada de la teoría cuántica, pues desempeñan un papel muy relevante en la transición entre los regímenes clásico y cuántico. Describe después el mapa de Poincaré, el caos suave y el teorema KAM con ejemplos del movimiento de estrellas en la Galaxia, moléculas y el problema anisótropo de Kepler.

Se ocupa de la entropía, partiendo de la idea surgida en termodinámica y que se introdujo después en la mecánica estadística como cuantificadora del desorden, para seguir con las entropías métrica y topológica, lo que plantea desde la perspectiva ergódica a través de la jerarquía sistemas ergódicos, mezcladores y de Kolmogorov. Cabe aquí decir que, aunque se trata de una capítulo excelente, se echa de menos un análisis de su interpretación en términos de la teoría de la información que facilita mucho el entendimiento intuitivo de sus consecuencias.

Sin duda el punto fuerte de este libro es su versión de la mecánica cuántica y del proceso de cuantización desde la perspectiva de la mecánica clásica, lo que ocupa toda su segunda parte. Gutzwiller expone claramente su punto de partida. Arranca de la comprobación de que la mecánica cuántica da predicciones cuantitativas no ambiguas y correctas en todos los experimentos reales, es decir, no mentales. En cuanto a estos últimos, son muy crudos y dedican poca atención a consideraciones prácticas importantes como es el ruido de fondo. Además es muy difícil localizar dónde interfieren las poco intuitivas predicciones de la mecánica cuántica con los prejuicios filosóficos que todos tenemos. La mecánica clásica, a su vez, funciona muy bien en el análisis de los problemas de su enorme ámbito de aplicación, pero es cierto que el caos destruye su aplicabilidad a problemas importantes (así es imposible, o al menos muy difícil, estudiar clásicamente la sección eficaz de las colisiones de un haz de electrones por una molécula, como hizo Rutherford en el caso más simple de la difusión de partículas α por núcleos de oro). Las dificultades que plantea esta limitación no deben olvidarse porque se refieran a situaciones tratables por la teoría cuántica. Por el contrario, ésta no puede entenderse a fondo sin su consideración. Ocurre que la mecánica cuántica mitiga el caos, suavizando las predicciones de la teoría, tanto que se puede decir que nos libera de la maldición del caos clásico.

Desde esta perspectiva, Gutzwiller examina la cuantización de los sistemas integrables, recordando el importante trabajo de Einstein de 1917, en el que llama la atención sobre el serio obstáculo que representaba para la teoría cuántica de entonces el que muchos sistemas no tengan los toros invariantes necesarios para aplicar las condiciones de cuantización de Bohr-Sommerfeld. Es sorprendentemente anómalo que sólo se haya encontrado una referencia a este trabajo visionario en los 40 años que le siguieron (el primero que lo citó fue C. Lanczos en 1949). Muy interesante resulta también el capítulo dedicado a las funciones de onda de los sistemas no integrables y a su espectro de energía.

Es éste un libro importante que será cita frecuente en los próximos años. Hay que agradecerle su amplia perspectiva, en la que se funden cuestiones que provienen de campos diferentes y que no se suelen encontrar juntas, a pesar de que el movimiento caótico obliga replantear la relación entre las mecánicas clásica y cuántica. Debe ser de gran utilidad la colección de ejemplos realistas que propone y que hace la lectura más atractiva, a pesar de lo inevitablemente pesado de algunos cálculos. Pero cabe advertir que este libro resultará difícil o incluso imposible para quienes no tengan familiaridad con la estructura matemática de las dos mecánicas.

Una obra muy recomendable que contribuye a aclarar uno de los puntos centrales de la física y de la matemática aplicada y que marcará la bibliografía de los próximos años. (A. F. R.)

Apuntes

Para alentar al estudiante ante el tropiezo suele recordársele en este mundo de competencia que Einstein suspendió en matemática y que algún fracaso tuvo nuestro Nobel Ochoa. Podríamos añadir la perla que nos cuenta Abraham Pais, autor de *Subtle is the Lord...*, una celebrada biografía intelectual del fundador de la teoría de la relatividad, y también de *Niels Bohr's Times*. De esta obra es la perla siguiente: "Bohr me dijo en cierta ocasión... que, si yo quería aprovechar trabajando con él, debía saber que era un dilettante... Caí en la cuenta del significado de esas palabras... años más tarde, cuando nos sentamos juntos en cierto coloquio desarrollado en Princeton. Se abordaban los isómeros nucleares. A medida que el conferenciante avanzaba en su exposición, Bohr iba mostrando signos de desazón, y me comentaba por lo bajo que todo aquello era mentira. No pudo aguantarse más e hizo ademanes de querer objetar. No se había levantado del todo, cuando se sentó de repente y me preguntó desasosegado: ¿qué es un isómero?"

Los modelos planetarios se construyen contando con las observaciones relativas a la masa total, radio, velocidad de rotación y campo gravitatorio del planeta. Los desarrollados hasta ahora para describir Júpiter y Saturno postulaban un núcleo rocoso central rodeado por una mezcla fluida de hidrógeno y helio. Se creía que esa mezcla se hallaba en fase parcialmente separada en Saturno, pero no en Júpiter. La separación de fase afecta al curso temporal del enfriamiento de los planetas. Cálculos más refinados de la energía total de entalpía confirman que ese proceso comienza a operar en el segundo.

Al registro fósil se le suele recriminar su mudez, su carácter incompleto que impide trazar la evolución de los organismos en un tiempo dilatado. Es obligado, pues, reconocer el favor cuando de sus entrañas la paleontología saca auténticas joyas. Tres piezas singulares acaban de revelársenos en poco tiempo: los primates antropoides más antiguos, los primeros restos de mamíferos placentarios australianos y lo que podría ser la prueba más remota de polinización de una flor por un insecto. Pero la suerte se ha rematado con la cuarta hoja del trébol, con la avalancha de estudios de Grube Messel, yacimiento cercano a Darmstadt y antiguo lago tropical del Eoceno, de hace unos 49 millones de años, descubierto en los años setenta del siglo pasado y abandonado hasta 1987. Los fósiles hallados se han conservado —partes blandas y restos estomacales incluidos— en un estado perfecto.

La comparación rigurosa exige conocer bien los términos que se relacionan. Para ahondar más allá de la piel de la asimilación del cerebro a un computador conviene saber que la capacidad del cerebro es del orden de 10^{15} bits, cifra que se deduce de la existencia de unas 10^{10} neuronas, unas 10^4 sinapsis por neurona, y un almacenamiento potencial de varios bits por sinapsis. Aun conscientes de que es un guarismo groseramente aproximativo podemos afirmar que corresponde a todos los libros escritos hasta hoy, un almacén molecular nada despreciable si no olvidamos que opera a menos de 50 watts. El ingeniero de telecomunicaciones que hubiera de introducir semejante capacidad en un solo ordenador debería contar con un consumo de potencia de unos 100 megawatts.

Pero las cifras no deben arredrarnos, pensaron Misha Mahowald y Rodney Douglas, que despidieron el año pasado con broche de oro: la construcción de la neurona de silicio, un circuito integrado que posee propiedades de las células nerviosas, opera en tiempo real de un modo analógico y consume cantidades pequeñas de energía. Su "neuromímesis" imita, en efecto, el comportamiento eléctrico de las neuronas, y, como éstas, es capaz de adaptar la frecuencia de los impulsos. Del tamaño de una uña, la neurona de silicio puede enlazarse con un largo centenar más en una pastilla (chip) de 1 centímetro cuadrado.

Finlandia ha ido por delante en una adecuada gestión de los recursos naturales, exenta de vacua retórica verde para la galería. Desde 1983 a 1985 trabajó un comité para el estudio de las especies animales y vegetales amenazadas de extinción. El informe de las conclusiones cifraba en 83 las que corrían gravísimo peligro. La mayoría viven cerca del límite climático de su área de distribución y donde las condiciones edafológicas adquieren un interés determinante; las plantas en peligro suelen florecer más tarde que sus congéneres del mismo país.